

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**Estudio y aplicación del estándar 802.11mc
como solución del problema de localización
en interiores**

**(Study and application of 802.11mc standard
as a solution for indoor positioning)**

Para acceder al Título de

***Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación***

Autor: Miguel Fernández Mata

09 - 2021

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Realizado por: Fernández Mata, Miguel

Director del TFM: García Gutiérrez, Alberto Eloy

Título: “Estudio y aplicación del estándar 802.11mc como solución del problema de localización en interiores”

Title: “Study and application of 802.11mc standard as a solution for indoor positioning”

Presentado a examen el día: 27-09-21

para acceder al Título de

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Suárez Rodríguez, Almudena

Secretario (Apellidos, Nombre): García Arranz, Marta

Vocal (Apellidos, Nombre): Santamaría Caballero, Luis Ignacio

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFM
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Máster Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

Después de un largo período, que ha supuesto mucho esfuerzo, finalizo este trabajo de fin de máster. Este proyecto ha sido muy importante y por eso me gustaría agradecer a todas aquellas personas que, de una manera u otra, me han ayudado y apoyado en este proceso.

En primer lugar, a mi director de TFM, Alberto, puesto que fue quien me propuso el tema del proyecto, así como el encargado de guiarme durante todo el transcurso del trabajo, prestándome su ayuda cuando era necesario y corrigiéndome cuando cometía algún error.

También quiero agradecer a mi familia, en especial padres y hermana, por darme su apoyo y comprensión a lo largo de toda mi etapa universitaria, haciendo que, tanto la carrera como el máster fueran un camino más llevadero. Han sido un gran pilar para ser constante y no decaer cuando la situación se complicaba.

Así mismo, doy las gracias a mi pareja, la cual siempre me ha ofrecido su ayuda y consejo en cualquier tema, independientemente de si era personal o académico. Su apoyo siempre me ha permitido alcanzar una versión mejor de mí mismo.

Finalmente quiero dar mi agradecimiento a amigos y conocidos que en determinados momentos del TFM me han prestado consejo para un mejor desarrollo de este.

Resumen

En la actualidad es común conocer los sistemas de posicionamiento global, como puede ser GPS, para la localización de dispositivos móviles. Por lo general estos sistemas ofrecen una buena precisión siempre y cuando el dispositivo tenga visión directa con los satélites que le ofrecen el servicio. El problema llega cuando el móvil se introduce en una zona interior donde no existe esa línea de visión con el satélite, puesto que la calidad del servicio se reduce drásticamente. Para ello existen diversos sistemas de localización en interiores, pero hoy en día no se ha encontrado una solución verdaderamente eficiente.

Lo que este proyecto propone es el estudio de un nuevo estándar wifi que se postula como la solución a este problema. La norma 802.11 mc propone una mejora en el servicio del posicionamiento en interiores mediante el uso de los tiempos de ida y vuelta de los paquetes. Por ello, lo que se plantea en este trabajo es una comparativa entre la idea que ofrece este estándar, con respecto a lo que ya se conocía de posicionamiento en interiores mediante el uso del wifi tradicional.

Esta comparativa se realiza por medio del desarrollo de un sistema propio de captación de datos. Esta información permite tener una referencia para evaluar si los resultados son suficientemente correctos con respecto a lo esperado. Finalmente, tras obtener los posicionamientos de numerosos casos, se realiza una evaluación de los errores para posibles mejoras de futuro.

Abstract

Actually, it is common to know global positioning systems, such as GPS, for locating mobile devices. In general, these systems offer good precision as long as the device has direct vision with the satellites that offer the service. The problem comes when the mobile is introduced into an indoor area where there is not line of sight with the satellite, and because of that, the quality of service is drastically reduced. There are various indoor location systems, but nowadays a truly efficient solution has not been found.

What this project proposes is the study of a new Wi-Fi standard that is postulated as the solution to this problem. The 802.11 mc standard proposes an improvement in the indoor positioning service by using round-trip times of packets. Therefore, what is proposed in this work is a comparison between the idea offered by this standard against the use of traditional Wi-Fi.

This comparison is carried out by using a self-developed system to collect data. This information allows to have a reference to evaluate if the results are sufficiently correct. Finally, after obtaining the positions of numerous cases, an evaluation of the errors is carried out for possible future improvements.

Índice

1. Introducción.....	10
1.2 Motivación y objetivos del proyecto	10
1.3 Organización del documento	11
2. Marco Teórico	12
2.1 Tecnologías empleadas para el posicionamiento	12
2.1.1 Posicionamiento en exteriores	12
2.1.2 Posicionamiento en interiores	14
2.2 Técnicas de posicionamiento.....	15
2.3 Tecnología wifi.....	15
2.3.1 Estándar 802.11mc	16
2.4 Trilateración	18
3. Estado del Arte.....	21
3.1 Estudio y desarrollo de una solución efectiva para el problema del posicionamiento en interiores	21
3.2 Estudio de la aplicación de Machine Learning a técnicas de posicionamiento en interiores	21
3.3 Mejoras basadas en Machine Learning sobre un sistema ble para la zonificación y localización en interiores	21
3.4 Mejoras basadas en el análisis del path-loss sobre un sistema BLE para la localización en interiores.....	22
4. Desarrollo	23
4.1 Campaña de medidas.....	23
4.1.1 Aplicación móvil.....	25
4.1.2 Recolección de datos	27
4.1.4 Medición.....	29
4.2 Estudio con RSSI.....	31
4.2.1 Cálculo del exponente de pérdidas y cálculo de distancias	31
4.2.2 Resultados de la trilateración	34
4.3 Estudio con RTT	39
4.3.1 Resultados trilateración RTT	41
4.4 Análisis de errores	45
4.4.1 Replanteamiento del algoritmo de trilateración	47
4.4.2 Replanteamiento de las distancias.....	49
4.4.3 Replanteamiento de las posiciones.....	50
4.4.4 Análisis de errores final	51
5. Conclusiones y líneas futuras.....	53
5.1 Conclusiones	53
5.2 Líneas futuras	53
6. Anexos	55
6.1 Anexo 1: Resultados RSSI	55
6.2 Anexo 2: Resultados RTT	66
Bibliografía	78

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de órbitas satelitales [15].....	13
Figura 2: Ejemplo de etiqueta QR	14
Figura 3: Esquema de intercambio de tramas para el RTT [14]	17
Figura 4: Planteamiento geométrico y analítico de la trilateración [9]	19
Figura 5: Ejemplos de casos desfavorables en la trilateración [13]	19
Figura 6: Baricentro [16]	20
Figura 7: Diagrama de flujo del proyecto.....	23
Figura 8: Sistema “fingerprint”	24
Figura 9: Aplicación móvil.....	26
Figura 10: Esquema del aula.....	30
Figura 11: Ubicación de uno de los routers en la sala.....	30
Figura 12: Histograma conjunto de los exponentes de pérdidas.....	32
Figura 13: Histograma truncado al 98%	33
Figura 14: Histograma para un exponente de pérdidas de 2.7.....	34
Figura 15: Trilateración RSSI $X=3$, $Y=5$	35
Figura 16: Trilateración RSSI $X=4$, $Y=7$	36
Figura 17: Trilateración RSSI pared izquierda.....	37
Figura 18: Trilateración RSSI pared derecha	37
Figura 19: Trilateración RSSI pared inferior	38
Figura 20: Trilateración RSSI pared superior	39
Figura 21: Histograma RTT	40
Figura 22: Histograma con la corrección de 2 metros	41
Figura 23: Trilateración RTT $X=3$, $Y=7$	42
Figura 24: Trilateración RSSI $X=2$, $Y=5$	42
Figura 25: Trilateración RTT pared inferior	43
Figura 26: Trilateración RTT pared izquierda	44
Figura 27: Trilateración RTT pared derecha	44
Figura 28: Trilateración RTT pared superior.....	45
Figura 29: Resultados RSSI con variación en la distancia	46
Figura 30: Resultado RSSI desfavorable con trazado de líneas	47
Figura 31: Resultados RSSI con R1 y R3 como referencia.....	48
Figura 32: Resultados RSSI con R2 y R3 como referencia.....	48
Figura 33: Resultados RSSI con R1 y R3 como referencia, siendo d_2 real	49
Figura 34: Resultados RSSI con R2 y R3 como referencia, siendo d_2 real	50
Figura 35: Resultado RSSI tras cambiar las posiciones de los APs.....	51

1. Introducción

En la actualidad es común que cualquier persona tenga acceso a su ubicación en tiempo real a través de su dispositivo móvil. Esta ubicación viene determinada principalmente por el Sistema de Posicionamiento Global o GPS, puesto que es la tecnología más asentada en este sector. Además de esta herramienta, se encuentran en desarrollo otras versiones similares llevadas a cabo en otros emplazamientos, como es el caso de GLONASS en Rusia o Galileo en Europa. A pesar de que estas tecnologías ofrecen una precisión bastante cercana a la real, tienen un error muy significativo cuando el dispositivo no tiene visión directa con los satélites que lo están localizando. Por este motivo se empezó a investigar la localización en espacios cerrados, principalmente edificios, donde esta tecnología no es tan precisa como debiera, en su mayor parte debido a la propia naturaleza de las señales electromagnéticas, que se ven afectadas por interferencias, atenuaciones o multicamino, entre otros fenómenos.

En este proyecto se pretende valorar una nueva alternativa para la localización en interiores, comparando sus resultados con los que se vienen empleando en tecnologías previas. Cada mejora que se hace en las prestaciones de los sistemas de posicionamiento existentes, abre todo un abanico de posibilidades para nuevos servicios que facilitan la comodidad de las personas.

1.2 Motivación y objetivos del proyecto

Visto que la mejora en la precisión de la ubicación de un dispositivo puede suponer un mayor número de servicios, así como una mejora en la calidad de los actuales; lo que se busca en este trabajo es probar si es posible utilizar una nueva tecnología, aun en desarrollo, con suficiente garantía y prestaciones.

En este trabajo se va a valorar si el nuevo estándar wifi 802.11 mc, el cual incluye el sistema RTT (Round-Trip Time o tiempo de ida y vuelta), puede ofrecer mejores prestaciones que lo que se viene utilizando a día de hoy en este sector. Para ello, uno de los principales objetivos es realizar una comparativa entre esta tecnología y la forma clásica de obtener distancias a partir de la potencia de la señal wifi, es decir, a partir del RSSI.

Los requerimientos principales para poder llevar a cabo la comparativa, pasan por llevar a cabo una campaña de medidas en un escenario controlado. Los datos recabados durante la campaña serán utilizados como referencia. A continuación, es necesario calcular las distancias entre el punto de medida y los elementos de referencia, para poder así, emplear un algoritmo de posicionamiento que estime la ubicación de dicha posición. El análisis de los resultados deberá corroborar si el nuevo estándar podría presentarse como una alternativa sólida.

1.3 Organización del documento

Una vez vista esta primera parte de introducción y objetivos, el capítulo dos da una visión de los principales conceptos teóricos necesarios sobre los que se apoya este trabajo. Este marco teórico plantea una primera visión sobre los sistemas de posicionamiento, tanto en exteriores como en interiores, así como, una explicación de las técnicas de posicionamiento más comunes. Además, se aborda el tema de la tecnología wifi aportando información sobre el estándar 802.11 en general, así como del 802.11 mc de manera mucho más específica, por ser el eje central del proyecto. Finalmente, esta parte teórica termina con una explicación del algoritmo de trilateración que se emplea en el proyecto.

El capítulo 3 hace un repaso de estado del arte, y ofrece una pequeña visión acerca de otros estudios previos, de los que también se parte, ya que se llevaron a cabo con una temática similar, y que permiten aportar otro punto de vista al desarrollo del trabajo.

En el cuarto capítulo se expone el desarrollo práctico del trabajo, explicando cada fase detalladamente, desde la campaña de medidas, la obtención y análisis de los resultados, y el estudio de los errores.

Finalmente, en el último capítulo, se extraen una serie de conclusiones acerca de la experiencia y de los resultados obtenidos, así como los principales puntos abiertos o futuros desarrollos que pueden tomar este trabajo como punto de partida.

2. Marco Teórico

El segundo capítulo de este proyecto se centra en proporcionar la información básica para entender los conceptos que rodean este trabajo. En este apartado se explican algunas de las tecnologías más empleadas tanto en el posicionamiento en exteriores como en interiores, así como las técnicas de posicionamiento más comunes, entre otros temas. Así mismo, también se enfoca en explicar con mayor detalle la tecnología wifi empleada en este proyecto y el algoritmo de posicionamiento elegido.

2.1 Tecnologías empleadas para el posicionamiento

La localización en exteriores ofrece una gran información acerca de la posición que ocupa un objetivo, pero dependiendo de la línea de visión del dispositivo con el satélite, la precisión de la medida puede reducirse significativamente. Por esta razón, el posicionamiento en interiores emplea otras tecnologías que puedan añadir precisión a esta medida y sirvan de complemento a la que ofrecen los satélites. En función de si la localización es en exterior o interior, las tecnologías empleadas son diferentes, basándose las primeras en tecnología satelital, y las segundas, en radiofrecuencia con dispositivos a corta distancia.

2.1.1 Posicionamiento en exteriores

Como se muestra en [1], la localización en exteriores se consigue mediante el uso de los sistemas globales de navegación por satélite o Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Los sistemas GNSS son constelaciones de varios satélites que trabajan conjuntamente para proporcionar señales desde el espacio que transmiten datos de posición y de tiempo a los receptores. En la actualidad sólo 2 sistemas tienen el despliegue necesario para considerarse como totalmente operativos (GPS y GLONASS). Los sistemas GNSS más desarrollados son los siguientes:

- GPS: Como refleja [2], este sistema es propiedad del departamento de defensa de los Estados Unidos. Ofrece un servicio de posicionamiento estándar, disponible para cualquier persona, y uno de posicionamiento preciso, restringido a las fuerzas armadas del país. Utiliza acceso múltiple por división de código (CDMA). En la actualidad, su constelación se compone de 31 satélites orbitando a una altitud de unos 20.200 km.
- GLONASS: En [3] se indica que, es el sistema que desarrolló Rusia como respuesta al GPS. Al igual que su rival, este sistema está controlado por el departamento de defensa de su país. Utiliza acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA). En la actualidad, su constelación se compone de 24 satélites situados en tres planos orbitales distintos con una inclinación respecto al ecuador de 64.8°. Cada plano orbital cuenta con 8 satélites que tardan en dar una vuelta completa a la tierra 11 horas 15 minutos y 44 segundos. Además, la altitud de los satélites es de 19.140 km.

- Galileo: En [4] se observa que, es el nombre que recibe el sistema GNSS impulsado por la Unión Europea. A día de hoy, no todos los satélites que forman la constelación han sido desplegados. A diferencia de las otras dos alternativas, el control de este sistema se lleva a cabo por una autoridad civil, y no militar. Se estima que cuando esté desplegado en su totalidad, podrá ofrecer servicios de posicionamiento más precisos y confiables que los actuales. La constelación completa estará formada por 30 satélites distribuidos uniformemente alrededor de tres planos orbitales inclinados en un ángulo de 56 grados con respecto al ecuador, es decir, cada plano contará con 10 satélites, donde 9 serán operativos y 1 estará de repuesto, por si alguno de los operativos sufriese algún error. Los 3 satélites restantes estarán emplazados en la órbita geoestacionaria.
- Beidou: También llamado COMPASS, es el sistema GNSS desarrollado por China, como se indica en [3]. Es un sistema que se encuentra todavía en desarrollo. Cuando la constelación esté desplegada al completo, esta contará con 35 satélites, 5 en la órbita geoestacionaria, 27 en la órbita media, distribuidos en tres planos orbitales inclinados a 55° respecto al ecuador.
- IRNSS: Como muestra [6], es el sistema GNSS que está siendo desarrollado por India. Tendrá el uso estándar para todos los usuarios y el uso encriptado para personas autorizadas. En la actualidad disponen de 4 satélites en activo para cubrir la zona de la India.
- QZSS: En [5] se indica que, es el sistema desarrollado por Japón, se compone de 4 satélites en órbita elíptica sobre el país.

En la Figura 1 se observa un esquema con las órbitas en las que operan estos sistemas.

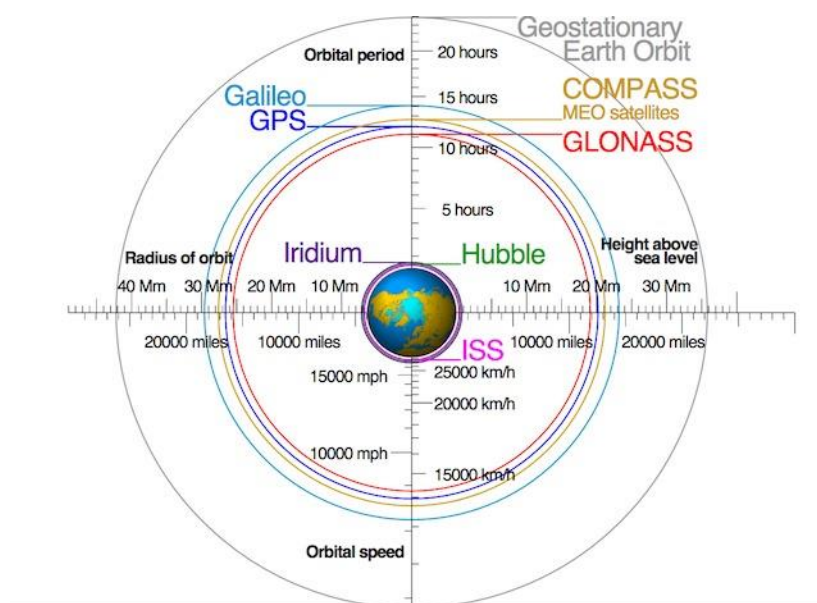


Figura 1: Esquema de órbitas satelitales [15]

Estos son solo algunos de los ejemplos para posicionamiento en exteriores desarrollados por diferentes naciones, desarrollados a nivel global, con mayor o menor éxito entre los usuarios de a pie.

2.1.2 Posicionamiento en interiores

Para la localización en interiores se emplean, principalmente, tecnologías de radiofrecuencia de corto alcance. Algunos de los ejemplos más comunes, que se muestran en [10] son:

- Ultra banda ancha: Permiten enviar grandes paquetes de información en comunicaciones de corto alcance. Emplea la banda que se encuentra entre 3.1 GHz y 10.6 GHz, es decir más de 7 GHz de anchura, lo que le permite tener canales de 500 MHz. Esto hace que se produzcan fenómenos de interferencia con otros elementos, por lo que los equipos tienen que encontrarse relativamente cerca para disminuir este efecto.
- RFID: Tecnología inalámbrica empleada en el reconocimiento de etiquetas adheridas a diferentes objetos. El más conocido de este tipo es el NFC, el cual posee un alcance de unos pocos centímetros.
- Códigos QR: Esta tecnología no emplea señales de radiofrecuencia, sino que en su lugar se aprovecha la cámara de un dispositivo móvil para reconocer la etiqueta que se desea leer. El funcionamiento es similar al del NFC, es preciso acercar el dispositivo a la etiqueta para obtener la información. En la Figura 2 se observa un ejemplo de etiqueta QR.



Figura 2: Ejemplo de etiqueta QR

- Bluetooth: Tecnología inalámbrica empleada en dispositivos móviles cuyo alcance ronda los 10 metros, aunque existen versiones que pueden llegar a los 100 metros. Permite la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos y trabaja en la banda de 2.4 GHz.
- Wifi: Tecnología inalámbrica empleada comúnmente para el uso de Internet. Ofrece grandes ventajas como la velocidad de transmisión o su bajo coste. Al igual que Bluetooth trabaja en la banda de 2,4 GHz, aunque también puede trabajar en la de 5 GHz en sus últimas versiones.

Estos son algunos de los ejemplos más comunes empleados en localización en interiores. Para este proyecto se ha elegido la tecnología wifi principalmente porque se encuentra ampliamente desplegada en multitud de lugares y supone un gran ahorro en cuanto a despliegue.

2.2 Técnicas de posicionamiento

Existen muchos factores a partir de los cuales poder realizar una estimación de la posición de un objeto. Alguno de los más comunes, mostrados en [10] son los siguientes.

- Tiempo de Llegada (ToA): Esta técnica consiste en el cálculo de la relación existente entre el tiempo de propagación de una señal y la distancia entre el emisor y el receptor.
- Diferencia de tiempos entre llegadas (TDoA): Similar al caso anterior, con la diferencia de que no se emplean tiempos absolutos, por lo que no es necesario sincronizar los relojes. Lo que se estima es la diferencia de tiempos entre una señal acústica y una electromagnética.
- Ángulo de Llegada (AoA): Determina la ubicación del objeto a partir del ángulo de llegada. Necesitas pocas antenas para determinar la posición, pero implica que el objeto tenga línea directa con el emisor, por lo que lo hace difícil en interiores.
- Potencia de la señal recibida (RSSI): Este modelo se basa en la atenuación que sufre la señal a medida que se va alejando del emisor. El problema de esta técnica es que la atenuación de la señal no es constante porque puede variar por distancias, interferencias o reflexiones, entre otros motivos.

Para este proyecto se realiza una comparativa entre las virtudes que puede ofrecer la técnica de posicionamiento basada en el tiempo entre llegadas (el cual es el sistema empleado en RTT) con respecto a la que emplea potencia de señal (RSSI)

2.3 Tecnología wifi

El wifi es una tecnología que permite la conexión inalámbrica entre dispositivos. Además de esa interconexión, también permite que se comuniquen con Internet. Estas funciones se llevan a cabo a través de puntos de acceso inalámbricos.

Como aparece en [7], esta tecnología nace por la necesidad de establecer una conexión inalámbrica que fuese compatible entre varios dispositivos. Por ello en 1999 se funda la Wi-Fi Alliance con el objetivo de diseñar una marca que permitiese fomentar más fácilmente la tecnología inalámbrica y asegurar la compatibilidad de equipos.

El estándar 802.11 es una familia de normas creadas por el IEEE. Define la modalidad de interconexión entre estaciones utilizando el aire como medio de propagación, lo que constituye hoy uno de los estándares de mayor interés para la evolución de las tecnologías de interconexión en área local. Existe una gran diversidad de estos estándares dentro de la familia 802.11, abarcando conceptos como las velocidades de transmisión que emplean, las frecuencias de trabajo o las modulaciones. Algunos de los estándares más comunes son los siguientes.

- 802.11 a: Es un estándar también conocido como Wi-Fi5. Su misión es crear un estándar de WLAN en la banda de 5 GHz, capaz de alcanzar tasas de hasta 54 Mbps. Se publicó en el 1999.
- 802.11 b: Es un estándar también conocido como Wi-Fi. Está pensado para WLAN en la banda de 2.4 GHz, con una tasa que alcanza los 11 Mbps. Fue publicada en el 1999.
- 802.11 g: Pretende desarrollar una extensión de la 802.11b, higher speed PHY, capaz de mantener la compatibilidad con la 802.11b. El objetivo inicial de este era alcanzar al menos 20 Mbps y se ha conseguido llegar hasta los 54 Mbps
- 802.11 i: Esta norma detalla los mecanismos de seguridad para redes inalámbricas, reemplazando la breve cláusula de autenticación y privacidad de la norma original con una cláusula de seguridad detallada.

Por otro lado, algunos de los estándares más recientes serían los que se comentan a continuación.

- 802.11 r: (fast roaming): está enfocado a permitir la conexión continua a clientes en movimiento, pensando sobre todo en aplicaciones de VoIP.
- 802.11 s (mesh): define como los dispositivos inalámbricos pueden interconectarse para crear una red inalámbrica en malla, que puede utilizarse para topologías relativamente fijas y redes inalámbricas.
- 802.11 v (network management): Enfocado a la simplificación de la gestión de redes inalámbricas. Ofrece un mayor control sobre los clientes wireless y equilibra automáticamente las cargas de trabajo entre los distintos puntos de acceso.
- 802.11 w (management security frame): Extiende la protección que propone el estándar 802.11i más allá de los datos hasta las tramas de gestión, responsables de las principales operaciones de una red.

El estándar que más afecta en este proyecto es el 802.11 mc, puesto que con él aparece la idea de RTT para posicionamiento wifi en interiores.

2.3.1 Estándar 802.11mc

Como indica [8], la norma 802.11mc es el nuevo estándar de conectividad que se implementa en Android. Este sistema se plantea como una revolución en la manera en la que se utilizan los dispositivos móviles en interiores. También llamado WiFi Round-Trip Time (RTT), es capaz de conocer la distancia a la que se encuentra un dispositivo móvil de un router o punto de acceso sin necesidad de estar conectado a él.

La idea es que el móvil sepa en todo momento cuál es la ubicación del router, mientras que el router no tiene por qué conocer la ubicación del móvil, con el fin, fundamentalmente, de mantener la privacidad del usuario.

En este sistema el método de posicionamiento es similar al del GPS, en el cual se necesitan 3 satélites para localizar un punto sobre un plano en dos dimensiones. En este caso se necesita el tiempo que tarda la señal en viajar desde el móvil al router. Conociendo 3 puntos de acceso alrededor del móvil, podría llegar a ofrecer una precisión de entre 1 y 2 metros, lo cual sería impensable utilizando la localización satelital.

Como se explica en [14], para calcular la distancia del punto de acceso al dispositivo móvil se requiere conocer los tiempos de ida y vuelta entre ambos equipos. Esta medición de tiempos se realiza mediante sesiones FTM (Fine Time Measurement). Como se observa en la Figura 3, el dispositivo móvil envía una petición al AP para que inicie la sesión FTM. El router inicia el envío de la petición, la cual será un “ping” que debe devolver el dispositivo móvil, marcando como t1 el instante en el que empezó dicho envío. En el dispositivo móvil se recibe dicha información FTM y se devuelve un ACK de vuelta al AP. El instante en el que el dispositivo móvil recibió la señal FTM se denomina t2 y el momento en el que devuelve el ACK t3. Una vez de vuelta en el AP, se vuelve a observar el instante en el que se recibe la señal, obteniendo así t4. Este proceso se ve fuertemente afectado por interferencias, por lo que es preciso realizarlo reiterativamente para obtener mediciones fiables.

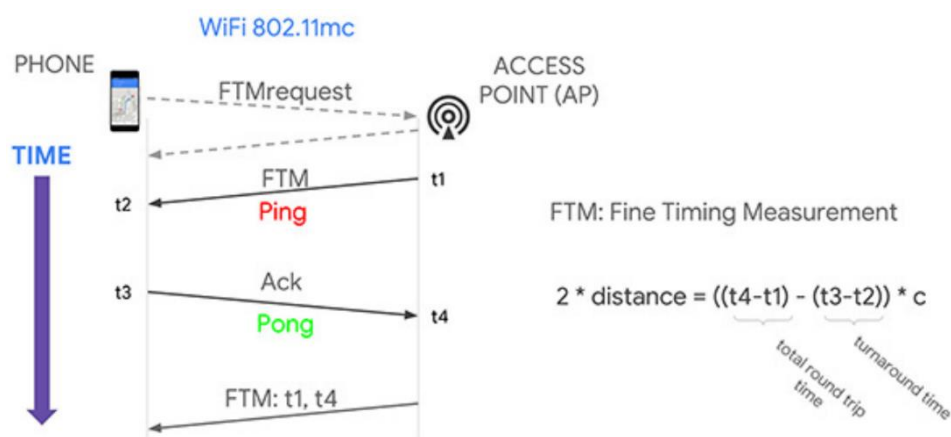


Figura 3: Esquema de intercambio de tramas para el RTT [14]

Con los cuatro tiempos ya es posible obtener la distancia entre ambos dispositivos de manera muy sencilla. El tiempo del RTT se calcula como la diferencia entre el instante en el que llegó la trama con respecto al instante en el que se envió. El retardo se determina como el tiempo que tardó el dispositivo móvil en devolver el ACK desde que recibió la señal FTM. El siguiente paso consiste en restar al tiempo de RTT el retardo introducido por el teléfono y de esta forma obtener únicamente el tiempo que tarda la señal en viajar. A dicho cálculo se le divide entre 2 porque si se tiene tanto el tiempo de ida como el de vuelta en la ecuación la distancia saldría el doble de la real. De esta forma se obtiene el t_{TOF} , es decir, el tiempo medio de ida que tarda la señal en viajar.

Finalmente, el cálculo de la distancia se obtiene del producto de dicho tiempo por la velocidad de la onda electromagnética, la cual es igual a la de la luz en el vacío ($c=3 \cdot 10^8$ m/s).

$$\begin{aligned} t_{RTT} &= t_4 - t_1 \\ \tau &= t_3 - t_2 \\ t_{TOF} &= \frac{t_{RTT} - \tau}{2} \\ d &= t_{TOF} \cdot c \end{aligned}$$

Ecuación 1: Desarrollo para el cálculo de la distancia (RTT) [14]

A partir de estos cálculos ya se puede obtener la distancia del dispositivo con respecto a los tres APs y obtener así su posición relativa con bastante precisión.

Este sistema se prevé que sea muy útil en sitios cerrados donde sea difícil ubicarse, como puede ser el caso de centros comerciales, museos y hospitales. Algunos usos cotidianos podrían darse en el hogar, puesto que, al reconocer la habitación exacta en la que se encuentra el dispositivo, los componentes domóticos de la vivienda podrían interactuar de una forma más dinámica a la actual.

Los dispositivos empleados para este proceso son tres routers “Google Wifi”, unos puntos de acceso compatibles con el estándar 802.11 mc. Como actualmente no es muy común encontrar equipos compatibles con el estándar, fue necesario adquirir unos dispositivos que permitiesen emplear este sistema.

2.4 Trilateración

La trilateración es el algoritmo de posicionamiento elegido para localizar el dispositivo a partir de la distancia. Como explica [9], este método matemático determina la posición relativa de un objeto a partir de la geometría de triángulos. A diferencia de la triangulación, que es más conocida y emplea la medida de los ángulos, la trilateración emplea la localización de dos o más puntos de referencia (router o puntos de acceso) y la distancia entre el objeto y dichos puntos. Para determinar la posición sobre un plano en 2D son necesarios al menos tres puntos de referencia, siendo esta opción la elegida para el proyecto.

En la Figura 4 se observa el planteamiento geométrico del modelo, así como el planteamiento analítico. Geométricamente, la idea consiste en que, conocida la distancia de cada punto de acceso al objetivo, se trazan las circunferencias de cada uno de ellos. De esta forma, la zona donde converjan todas las circunferencias será donde se encuentre el dispositivo. Analíticamente la idea es similar, conocida la distancia de cada punto de acceso, así como su posición relativa sobre el plano, la idea consiste en resolver el sistema de ecuaciones. En este caso se cuenta con 3 ecuaciones no lineales y 2 incógnitas, por lo que se resuelve el sistema con 2 de las ecuaciones dando como lugar dos posibles

resultados para cada posición. La tercera ecuación sirve de referencia para elegir entre los dos resultados arrojados por el sistema.

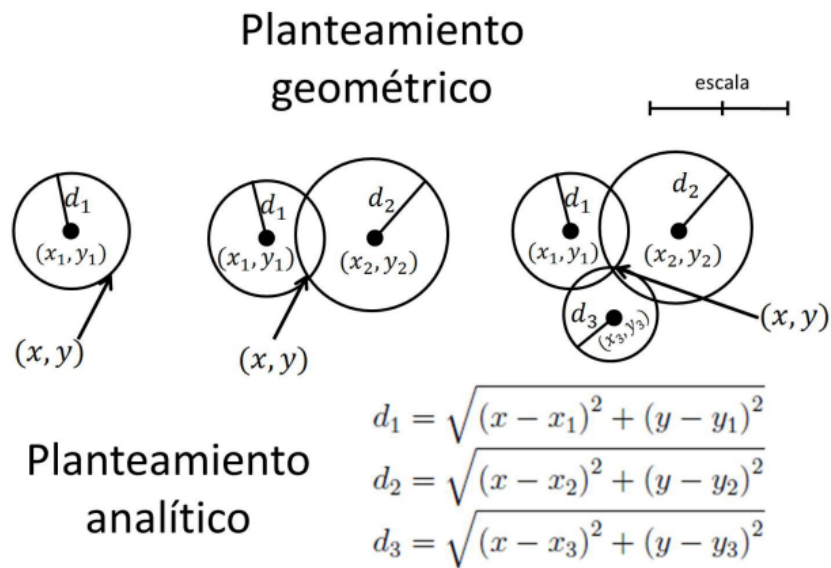


Figura 4: Planteamiento geométrico y analítico de la trilateración [9]

El caso planteado anteriormente es muy utópico y poco probable. Como explica [13], algunos casos más reales que pueden suceder a la hora de tener que realizar la trilateración son los que aparecen en la Figura 5.

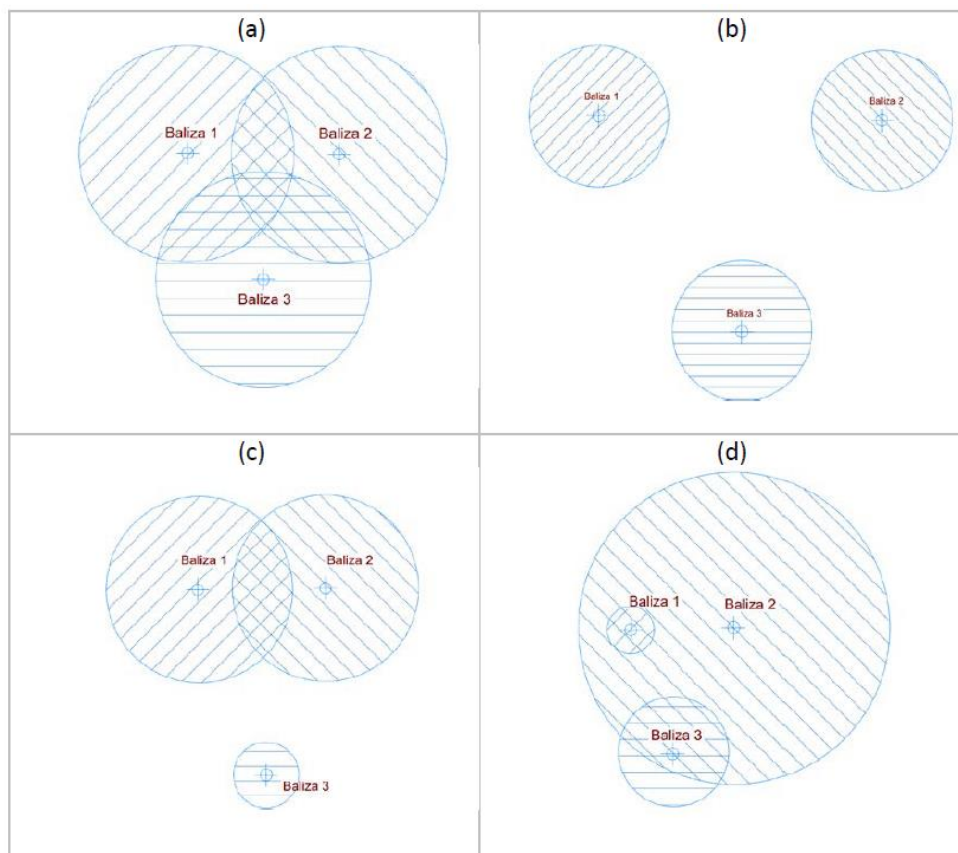


Figura 5: Ejemplos de casos desfavorables en la trilateración [13]

En ocasiones el cálculo de la distancia ya sea a partir del RSSI o del RTT, puede dar una sobrestimación de este parámetro, haciendo que las 3 circunferencias se corten en más de un punto, como sucede en el caso a). Si por el contrario la estimación es inferior, también se puede dar el caso de que no corten y por tanto sucedería la situación b). En el caso c) dos de las circunferencias tienen puntos de corte en común, pero ninguno con la tercera. Por último, en el caso d), uno de los radios es incluso mayor que la distancia entre los nodos, dando lugar a una circunferencia que puede llegar a contener a otra, o a las dos si se diese el caso.

Una vez obtenidas las circunferencias, es preciso obtener los puntos a partir de los cuales se forma el triángulo en cuyo interior se encuentra la posición relativa del objeto. Para obtener dichos puntos es preciso seguir los siguientes pasos.

- Si dos circunferencias se cortan en un único punto: Se toma ese punto.
- Si dos circunferencias se cortan en dos puntos: Se toma, el más cercano a la tercera circunferencia.
- Si dos circunferencias no se cortan: Se toma el punto más cercano y equidistante entre ellas.

El último paso para obtener la posición consiste en obtener el centro del triángulo que forman los tres puntos calculados anteriormente. Un triángulo puede tener varios tipos de centro, pero para este caso se eligió el baricentro para seguir el mismo esquema que en las investigaciones previas. El baricentro es el punto de intersección de las medianas de un triángulo, es decir, el cruce entre los segmentos que unen un vértice con el punto medio del lado opuesto. En la Figura 6 se observa un ejemplo de baricentro.

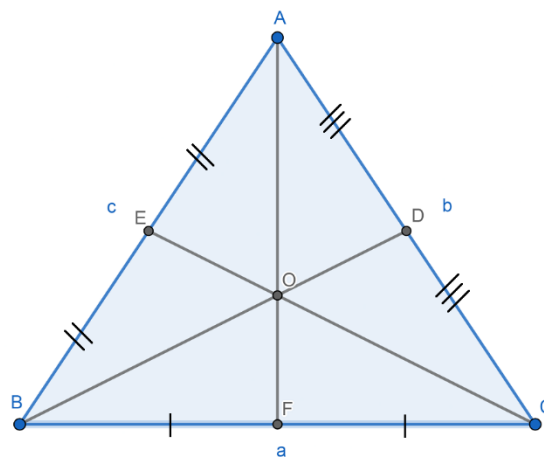


Figura 6: Baricentro [16]

Con todas estas herramientas es con lo que se realiza este trabajo, permitiendo así realizar un estudio detallado sobre el posicionamiento en interiores.

3. Estado del Arte

En este capítulo se resumen las investigaciones previas más recientes, relacionadas con este trabajo, a partir de las cuales se define el punto de referencia de partida.

3.1 Estudio y desarrollo de una solución efectiva para el problema del posicionamiento en interiores

En este trabajo, explicado en [10], se diseñó un sistema de posicionamiento en interiores basado en tecnología Bluetooth. Para ello hace uso de balizas distribuidas en un entorno conocido para estimar la posición del objeto. Este método presenta un bajo coste y facilidad de colocación en el entorno.

Para llevar a cabo este proyecto se empleó una Raspberry Pi y un Arduino para interpretar los “beacon” enviados por las balizas. Se realizó el estudio tanto en el pasillo como en el aula multiusos del edificio de I+D+i, extrayendo una multitud de resultados en diferentes posiciones.

Como conclusión a este trabajo se extrajo que los resultados eran bastante prometedores ofreciendo un nuevo método de posicionamiento que abre la vía a futuras investigaciones. A pesar de ello existía una solución de compromiso, por la cual se debía encontrar el equilibrio entre un sistema con una mayor precisión o un sistema con un mayor coste energético.

3.2 Estudio de la aplicación de Machine Learning a técnicas de posicionamiento en interiores

En este trabajo, explicado en [11], se utilizan las técnicas de aprendizaje autónomo como solución al problema de la localización en interiores. Tras realizar un estudio de las diferentes técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje autónomo, se selecciona aquella que les ofrece mejores resultados. El estudio se apoya en el uso de algoritmos genéticos y redes neuronales para optimizar los resultados que arrojan los sistemas de posicionamiento en interiores, como pueden ser el sistema wifi o bluetooth.

La conclusión que arroja este proyecto es que las herramientas de aprendizaje autónomo pueden ser la solución a algunos de los problemas más comunes que producen las técnicas tradicionales de posicionamiento en interiores. La combinación entre el uso de tecnología wifi y balizas bluetooth se presenta como una opción muy viable para el posicionamiento en interiores.

3.3 Mejoras basadas en Machine Learning sobre un sistema para la zonificación y localización en interiores

En este proyecto, explicado en [12], se plantea el análisis y la aplicación de diferentes algoritmos y modelos de Machine Learning sobre los conjuntos de

datos de las distintas medidas. Emplea los datos obtenidos en un proyecto anterior para procesarlos mediante algunas de las técnicas de inteligencia artificial y de esta forma plantear mejoras en los resultados aportados en el trabajo previo.

La conclusión que arroja este estudio indica que, aunque en algunos casos las mejoras sean muy leves, siempre se presenta un progreso con respecto a los resultados previos, por lo que los modelos de Machine Learning se presentan como una buena opción para complementar los resultados que arrojan las técnicas de posicionamiento tradicionales.

3.4 Mejoras basadas en el análisis del path-loss sobre un sistema BLE para la localización en interiores

En [13] se explica que el propósito de este trabajo consiste en la mejora de los resultados obtenidos en un estudio previo. Lo que este proyecto propone es una mejora en el cálculo del exponente de pérdidas mediante una calibración dinámica de los datos recogidos durante el experimento. Con esta implementación lo que se busca es que los datos sean más realistas y por tanto mejores que los que se obtienen al presuponer un exponente de pérdidas aproximado.

La conclusión que ofrece es la esperada, puesto que este sistema prueba que existe una mejora en los resultados con respecto a los que se daban en las pruebas anteriores.

4. Desarrollo

Una vez detallado todo el contexto teórico de los apartados previos, se procede a la explicación del desarrollo del proyecto. Este trabajo se divide en 3 grandes bloques, que suceden uno a continuación de otro:

- Comienza con la campaña de medidas que se encarga de recabar un conjunto de datos que permiten utilizar como referencia para evaluar los resultados.
- Seguido se utilizan esos datos para el estudio de resultados en el que se aplican los algoritmos para obtener las localizaciones.
- Finalmente se hace un análisis de los errores para valorar si las ideas iniciales del proyecto son correctas o si por el contrario es necesario replantearse algunos aspectos.

La Figura 7 muestra, de manera más detallada, el diagrama de flujo de todo el proyecto en cada una de las etapas.

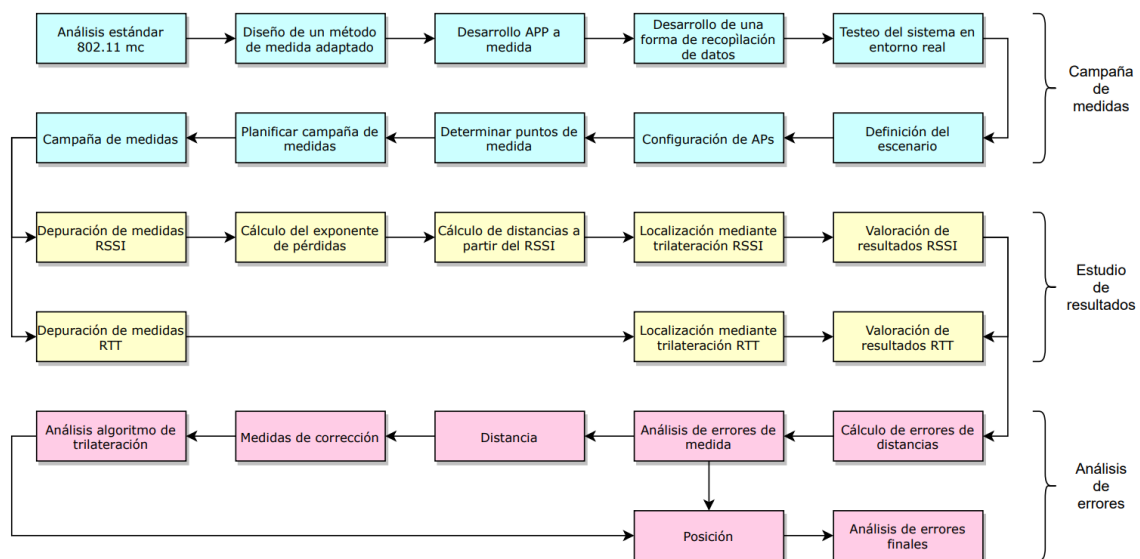


Figura 7: Diagrama de flujo del proyecto

Cada uno de los siguientes bloques se describirán de manera más detallada en los siguientes subapartados.

4.1 Campaña de medidas

El bloque denominado campaña de medidas está formado por el conjunto inicial de actividades del trabajo.

1. En primer lugar, se hizo un análisis del estándar 802.11 mc para comprobar las ventajas que ofrece y si es viable investigar acerca de él.

2. Para poder emplearlo, se diseñó un método de medida adaptado a este caso en el cual se decidió que una comparativa entre la localización mediante el wifi estándar y el wifi RTT podría ser un buen estudio.
3. Para llevar a cabo este estudio se decidió que era necesario realizar un “fingerprint” de un escenario para obtener una serie de datos que sirvieran como referencia.

La forma en la que se decidió recabar esos datos fue mediante una aplicación móvil hecha a medida para este caso. Esta app envía los datos que recaba a un servidor, también diseñado a medida, que almacena la información en una base de datos. La Figura 8 muestra un esquema del sistema completo de recolección de datos.

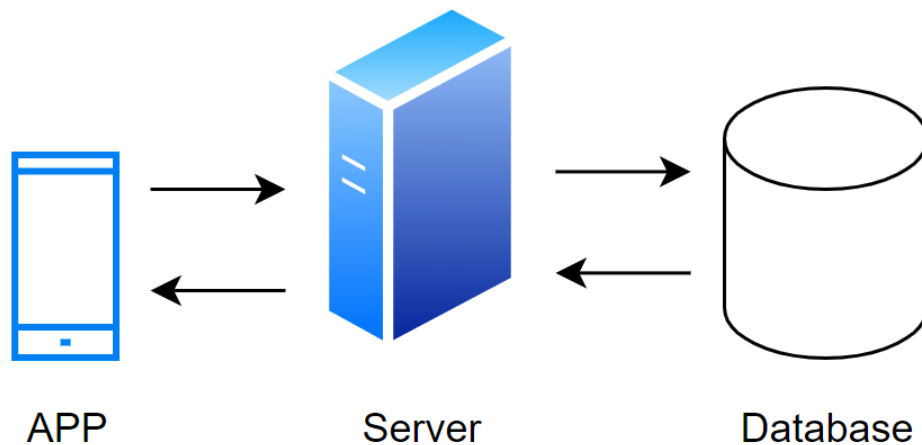


Figura 8: Sistema “fingerprint”

Con el sistema ya diseñado es preciso testear su correcto funcionamiento en diversos casos para poder aplicarlo al entorno real. Cuando el sistema ya estaba listo para su implementación se decidió que el escenario en el que se realizaría el estudio sería el aula multiusos del edificio de I+D+i, por ser una habitación muy grande que permite hacer un gran análisis, así como el entorno en el que se realizaron estudios previos, por lo que puede permitir una comparación más directa. Para este estudio se empleó unos puntos de acceso especiales compatibles con el estándar 802.11 mc, por lo que fue necesario configurarlos y elegir unos sitios adecuados en el escenario. El siguiente paso fue planificar la forma en la que se realizaría la campaña de medidas, seccionando la habitación y decidiendo el método que se emplearía para recabar toda la información necesaria. El último paso de este bloque fue ir punto por punto en todas las zonas de la sala realizando escaneos de las redes para dispositivos wifi estándar y para aquellos compatibles con wifi RTT.

En la campaña de medidas existen una serie de datos necesarios para el cálculo en ambas tecnologías, como puede ser la fecha en la que se realizó cada escaneo, la dirección MAC de cada router o el identificador, también llamado SSID. Sin embargo, si el análisis se realiza para la tecnología que no implementa el RTT, es importante conocer el nivel de potencia que llega al dispositivo (RSSI), mientras que, si se emplea la tecnología RTT, es interesante conocer la distancia estimada a partir del tiempo de ida y vuelta del paquete de datos.

El desarrollo de la app, el sistema para recolectar datos y la realización de medidas han sido las tres fases de este bloque que más esfuerzo y tiempo han requerido, por lo que se procede a una explicación más detallada en los siguientes subapartados.

4.1.1 Aplicación móvil

Este componente es el encargado de escanear la red en cada uno de los puntos que se requieran, recabando toda la información que pueda ser necesaria posteriormente. Como no existía ninguna aplicación que hiciese la función de la manera deseada se decidió desarrollar una app propia para este proyecto

La aplicación fue desarrollada sobre Android Studio en lenguaje java, y se compone de dos tipos de escaneos en función de si se desea analizar todo tipo de redes, o solo aquellas compatibles con RTT. La idea en ambos casos es similar, escanear la red, recoger los datos y enviarlos a un servidor. Sin embargo, la forma de implementarlo es algo diferente debido a que la tecnología RTT incluye comandos de programación propios, lo cual no resulta nada intuitivo a la hora de programar.

En la Figura 9 se observa la interfaz de la aplicación en tres situaciones.

- En la imagen de la izquierda se observa el menú inicial donde se decide qué función de escaneo se prefiere, la estándar (RSSI) o la compatible con RTT.
- En el centro se aprecia la interfaz de la aplicación antes de iniciar el escaneo, donde se pueden ver varias ventanas. En la parte superior se aprecia un cuadro en el que se listan los sucesivos puntos wifi disponibles. A continuación, una ventana de menor tamaño donde se muestran los resultados que indican si la comunicación con el servidor ha sido correcta o si hubo algún error. Las dos cajas que le siguen son apartados donde se debe introducir las coordenadas de referencia en las que se encuentra el dispositivo antes de que comience el escaneo. Finalmente aparece un botón que se encarga de iniciar la ejecución del programa.
- La última ventana muestra los resultados que devuelve después de realizar un escaneo de RTT. Si la aplicación devuelve datos de las redes significa que se han almacenado adecuadamente y lo que devuelve es parte de la información que se acaba de alojar en la base de datos. Si por el contrario apareciese un mensaje de error significa que existe algún problema al enviar los datos, pero como ya se dijo, la aplicación fue testada y se corrigieron esos errores iniciales.

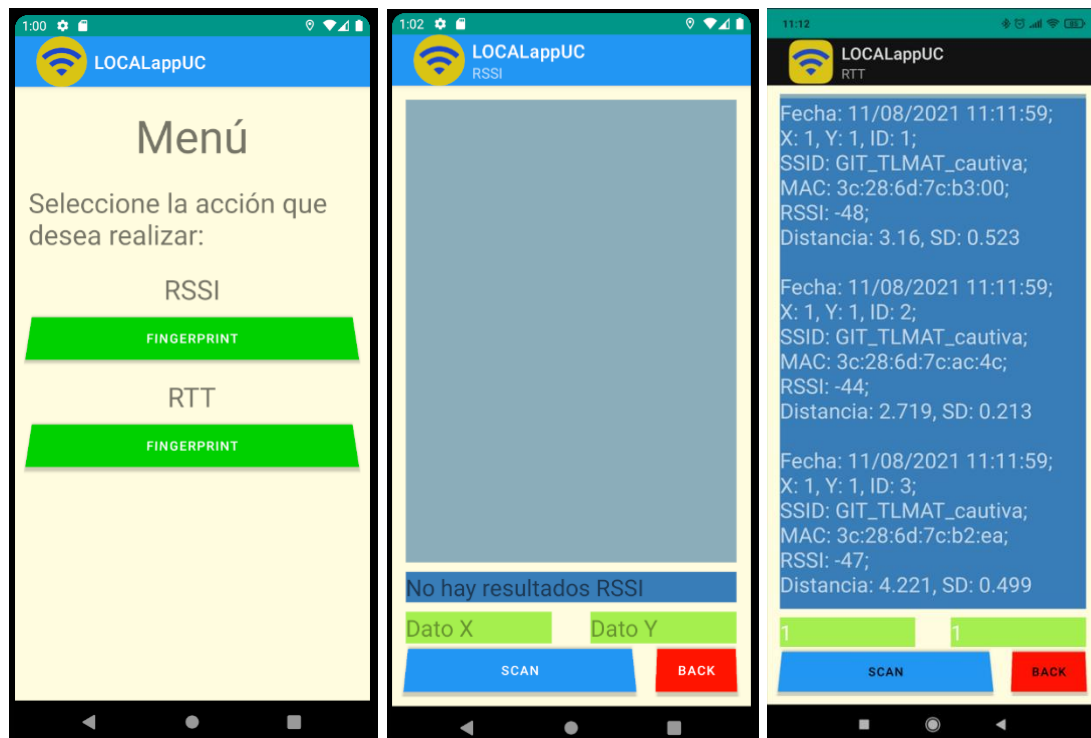


Figura 9: Aplicación móvil

El envío de los datos al servidor se realiza mediante peticiones HTTP, concretamente mediante el método POST, el cual se encarga en transmitir todos los datos del escaneo de forma que el servidor sea capaz de interpretarlos posteriormente. Por motivos de simplicidad los datos se envían como cadenas de caracteres en lugar de recurrir a formatos más típicos como pudiera ser JSON o XML.

Tanto la parte de la aplicación enfocada a los puntos de acceso wifi estándar, como la que se centra en RTT, tienen una interfaz idéntica, pero esta última rechaza todos aquellos APs que no sean compatibles con el estándar 802.11 mc.

Como se mencionó previamente, en ambos tipos de escaneos se recaban algunos datos comunes, pero algunos otros son exclusivos de una versión u otra. Los datos que se decidió que compartiesen ambos sistemas son los siguientes.

- **Fecha:** Es el parámetro de referencia que permite agrupar al conjunto de medidas que se han realizado durante el mismo escaneo en el mismo grupo. Esto es muy útil para funciones posteriores como la trilateración, donde se quiere tener bien separadas las mediciones de cada escaneo.
- **X:** Sirve para indicar la posición en el eje X de la sala en la que se está realizando la medida. Esta sala se dividió en 7 puntos en este eje.
- **Y:** Sirve para indicar la posición en el eje Y de la sala en la que se está realizando la medida. Esta sala se dividió en 12 puntos en este eje.
- **ID:** Sirve para listar cada una de las redes que se producen en un mismo escaneo.

- **SSID:** Es un identificador para cada punto de acceso. Permite reconocer rápido a un router por el nombre que se le ha otorgado.
- **MAC:** Es el identificador único de cada punto de acceso. Es importante en este trabajo porque varios router pueden compartir un mismo SSID, pero nunca pueden tener la misma MAC, por lo que permite reconocer a cada uno de ellos de manera inequívoca.
- **RSSI:** La potencia de la señal recibida es propia del wifi estándar, pero también es interesante conocerla en el caso de los sistemas compatibles con RTT. Esto es así porque en estos sistemas es un parámetro obtenido a partir del tiempo de ida y vuelta, es decir, no lo obtienen por el mismo método y permite hacerse una primera idea de si las medidas se pueden asemejar a las tradicionales.

En el caso de las redes RTT se pueden obtener algunos datos más que los comandos de este estándar permiten extraer directamente. Estos datos son los siguientes.

- **Distancia (RTT):** Estima la distancia desde el dispositivo móvil al router a partir del tiempo de ida y vuelta, como ya se explicó en la teoría. Devuelve la distancia en metros.
- **Varianza (RTT):** Es un parámetro que indica cuanto se puede alejar la distancia obtenida de la real por exceso o por defecto. Permite conocer un error máximo y mínimo de la medida. Devuelve la varianza en metros.

4.1.2 Recolección de datos

Este componente es el encargado de comunicarse con la aplicación móvil, recoger todos aquellos datos que le envíe y facilitárselos a la base de datos de manera adecuada para que se almacenen correctamente. Al igual que como pasó con la aplicación móvil, tanto el servidor como la base de datos fueron desarrolladas desde cero para poder diseñarlas a medida de cómo se requería en este proyecto.

El servidor elegido ha sido Apache sobre Ubuntu, el cual se ha instalado sobre una máquina virtual. Está programado en PHP debido a que era un lenguaje de programación con el que ya se estaba familiarizado y muy intuitivo para el diseño de servidores. A este servidor se le ha asignado un nombre de dominio gratuito mediante la web "No-IP" para poder acceder más cómodamente desde cualquier lugar. Para que se pudiese establecer esta conexión se configuró el router propio del domicilio para que cualquier petición a la dirección ip del servidor las redirigiese donde debe.

La base de datos está compuesta principalmente por dos tablas, la primera enfocada a guardar los datos de la aplicación que trabaja con el wifi tradicional, y la segunda orientada a almacenar la información de la aplicación que escanea los routers compatibles con el estándar 802.11 mc. Estas tablas son

independientes y aunque tengan campos en común toda la información se almacena y procesa completamente por separado la una de la otra.

Cada una de las tablas de la base de datos está formada por los campos que guardan los parámetros mencionados en el apartado anterior. Cada punto de acceso escaneado se sitúa uno a continuación del otro, ignorando si son de distintas fechas o posiciones en el plano. Esto se decidió hacer así porque se almacena suficiente información de cada uno de ellos como para poder diferenciarlo y trabajar con él sin error a confundirlo con otro. Parámetros como la fecha, la posición X e Y, y la MAC son cruciales para esta identificación.

Algunos de los ejemplos de cómo se almacena la información en cada tabla se puede observar en los siguientes ejemplos. La primera tabla hace referencia a la información guardada para los puntos de acceso de wifi tradicional.

Fecha	X	Y	ID	SSID	MAC	RSSI
29/06/2021 10:07	1	1	1	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b2:ee	-35
29/06/2021 10:07	1	1	2	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b2:ea	-42
29/06/2021 10:07	1	1	3	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:ac:50	-50
29/06/2021 10:07	1	1	4	SLM_2.4	ec:08:6b:37:b1:ac	-51
29/06/2021 10:07	1	1	5	TLMAT-CRUX	38:2c:4a:65:6f:a0	-51
29/06/2021 10:07	1	1	6	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b3:04	-52
29/06/2021 10:07	1	1	7	eduroam	20:b3:99:a8:ba:28	-53
29/06/2021 10:07	1	1	8	UNICAN-i	20:b3:99:a8:ba:29	-53
29/06/2021 10:07	1	1	9	eduroam	20:b3:99:a8:ba:20	-54
29/06/2021 10:07	1	1	10	UNICAN-i	20:b3:99:a8:ba:21	-54
29/06/2021 10:07	1	1	11	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b3:00	-55
29/06/2021 10:07	1	1	12	SLM_5	ec:08:6b:37:b1:ab	-59
29/06/2021 10:07	1	1	13	HOLANDA	00:80:5a:5a:e2:c5	-61
29/06/2021 10:07	1	1	14	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:ac:4c	-62
29/06/2021 10:07	1	1	15	gwMDEV	a8:54:b2:92:fa:11	-66

Tabla 1: Ejemplo de datos guardados para puntos de acceso tradicionales

En la tabla se aprecian los campos de fecha, las coordenadas x e y, un identificador para cada router, su SSID, su dirección MAC y su RSSI. En el caso de la segunda tabla, se hace referencia a la información guardada para los puntos de acceso compatibles con wifi RTT.

Fecha	X	Y	ID	SSID	MAC	RSSI	Distancia	Var
29/06/2021 10:08	1	1	1	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b2:ea	-58	3.522	0,457
29/06/2021 10:08	1	1	2	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b3:00	-67	17.749	1.515
29/06/2021 10:08	1	1	3	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:ac:4c	-69	10.702	1,17
29/06/2021 10:08	1	1	1	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b2:ea	-53	3.048	0,649
29/06/2021 10:08	1	1	2	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:b3:00	-65	19.123	0,56
29/06/2021 10:08	1	1	3	GIT_TLMAT_cautiva	3c:28:6d:7c:ac:4c	-68	10,37	2.088

Tabla 2: Ejemplo de datos guardados para puntos de acceso RTT

Esta tabla es muy similar a la anterior, con la diferencia de que se almacenan únicamente las redes compatibles con el estándar, y además de los parámetros de la tabla anterior, se incluyen la distancia calculada a partir del tiempo de ida y vuelta y su variación.

Ambas tablas son una pequeña muestra de la cantidad de datos almacenados.

4.1.4 Medición

La metodología empleada para realizar esta fase del proyecto consistió, en primer lugar, en elegir un entorno donde realizar las mediciones. La zona elegida fue el Aula de Usos Múltiples del edificio de I+D+i. Como se mencionó previamente, esto se debió a las dimensiones del aula que, permiten un estudio a mayor escala, y sobre todo a que los estudios realizados previamente por otros estudiantes de la facultad también se realizaron en esta aula. Esto último permite que se hagan comparativas entre diferentes tecnologías y métodos para poder llegar a la mejor solución posible.

Una vez en el aula, se estableció una malla de puntos que actúa como sistema de coordenadas de referencia para poder trabajar adecuadamente con las distancias. Como guía visual, se tomaron los cruces de las losetas del techo, de 60 cm, dejando dos losetas de margen entre cada punto. El resultado final deja 7 puntos en el eje de las X y 12 en el de las Y, dando un total de 84 puntos en los que realizar mediciones. La separación entre cada punto tanto en horizontal como en vertical es de 1.2 m. En la Figura 10 se puede observar el esquema del aula empleado con cada uno de los puntos que se midieron. Los puntos negros representan las posiciones de los routers, mientras que los puntos azules son cada una de las posiciones desde las que se realizan las medidas.

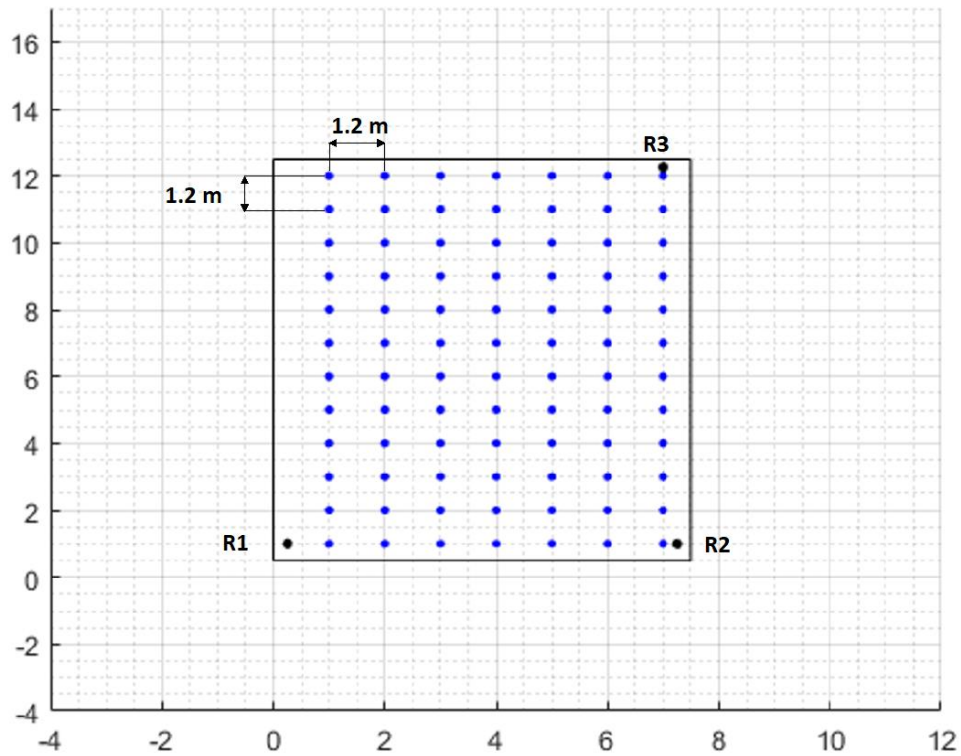


Figura 10: Esquema del aula

A modo de ejemplo, en la Figura 11 puede observarse la posición de uno de los router.



Figura 11: Ubicación de uno de los routers en la sala

Con la sala delimitada, el procedimiento a seguir consistió en realizar escaneos de las redes wifi, tanto para RTT como para las que no, en cada uno de los puntos en los que se dividió la habitación. En cada punto se decidió realizar unas diez medidas de cada tipo, aproximadamente, para poder tener varios resultados con los que comparar.

Como se indicó previamente, toda esta información se iba almacenando en la base de datos del servidor, para finalmente extraer todos los datos en forma de hojas de cálculo (Excel) que forman la referencia base del proyecto.

Como se mencionó previamente se realizaron medidas en un total de 84 puntos. En cada punto se realizaron unas 10 medidas en el caso de wifi tradicional y otras 10 en el caso de wifi RTT. Cada medición tradicional detectaba unos 30 puntos de acceso de media, mientras que las mediciones RTT únicamente detectaban los 3 puntos de acceso que se colocaron a propósito. Teniendo en cuenta todos estos datos se estima que se recibieran unos 25200 registros de acceso tradicionales con sus respectivos datos y unos 2500 registros de acceso compatibles con RTT. Estos datos, aunque son aproximados, permiten hacerse una idea de los volúmenes de datos con los que se tuvo que trabajar.

4.2 Estudio con RSSI

En esta parte del proyecto se emplean todos los datos almacenados previamente para realizar simulaciones de posicionamiento y analizar la calidad de estos en el caso estándar, es decir, la que se viene empleando tradicionalmente. Las simulaciones de estos resultados se realizan sobre el entorno de Matlab, debido a su facilidad para trabajar con expresiones matemáticas complejas, como puede ser el caso de los sistemas de ecuaciones no lineales. Los resultados que arroja este experimento sirven como muestra comparativa para valorar si la tecnología RTT supone una mejora en la precisión del posicionamiento.

El primer paso consiste en filtrar de todos los router, solamente los 3 con los que se está haciendo el estudio, a partir de sus MAC, para poder tener una comparativa equitativa en los dos casos. Una vez obtenidos los valores de RSSI de cada router en cada una de las posiciones se aplica la ecuación que permite obtener la distancia a partir del RSSI del wifi. La ecuación empleada, obtenida de [17], es la siguiente.

$$RSSI(dBm) = -10n \cdot \log_{10} d + A$$

Ecuación 2: Nivel de potencia en transmisiones radio

Pero en esta ecuación, no todos los parámetros son conocidos. El parámetro A es el nivel de potencia de referencia, es decir, el nivel de RSSI que tiene el router deseado a 1 metro. Este nivel tiene un valor de -32 en media entre los tres router. Por otro lado, el otro parámetro no conocido es el exponente de pérdidas “n”, el cual requiere de un análisis directo del espacio en el que se va a trabajar para obtener el valor adecuado.

4.2.1 Cálculo del exponente de pérdidas y cálculo de distancias

Como se indicó previamente, el exponente de pérdidas se ve afectado por el entorno en el que se realiza la transmisión de datos. Por ello, un cálculo preciso implica realizar un análisis del exponente de pérdidas adecuado a la habitación

que se va a analizar. Este factor es obtenido a partir de la siguiente expresión, la cual se extrajo de [17].

$$n = \frac{P_L(d_i) - P_L(d_0)}{10 \log_{10} \frac{d_i}{d_0}}$$

Ecuación 3: Exponente de pérdidas

En esta ecuación la d_i representa la distancia al punto que se desea medir, la d_0 la distancia de referencia, la cual es de 1 metro, como ya se mencionó, y la P_L representa las pérdidas de potencia en para cada una de las distancias.

El proceso empleado para obtener el exponente de pérdidas adecuado consistió en aplicar la expresión previa en cada uno de los puntos de medición de la sala, puesto que se conoce la distancia real a cada uno de ellos. Una vez obtenidos los exponentes de pérdidas para cada punto de la sala se hizo el valor medio de todos ellos para tener un punto razonable del que partir. Conocido dicho valor, se hizo un estudio de los valores que se encuentran en torno a este punto, por si alguno cercano pudiera ofrecer mejores resultados. El valor medio obtenido fue de 2.69, por lo que se analizaron los resultados arrojados por los valores comprendidos entre 2 y 3. En la Figura 12 se puede apreciar una gráfica donde se muestra la frecuencia de errores que existe para cada distancia con respecto al punto, es decir, refleja cuantos puntos se encuentran a cada distancia del real, por lo que cuanto mayor frecuencia exista en torno al cero, mejores serán los resultados.

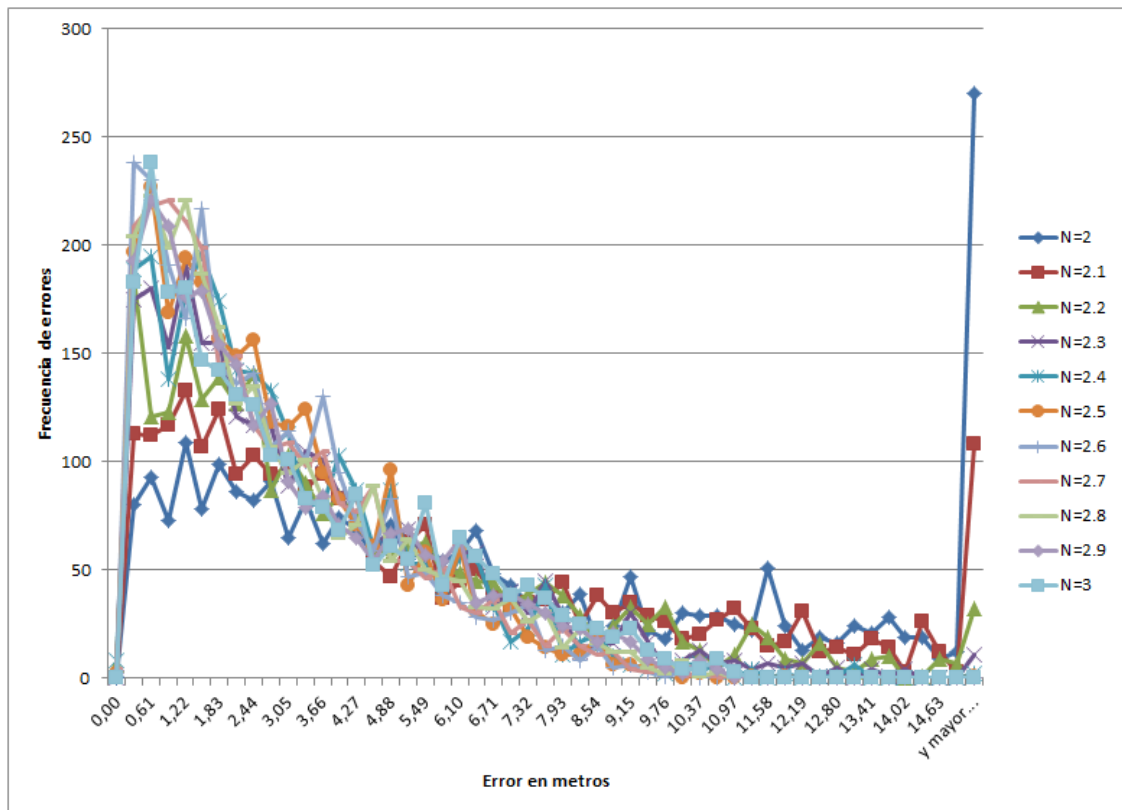


Figura 12: Histograma conjunto de los exponentes de pérdidas

Esta gráfica era muy engorrosa de analizar, por lo que se recurrió a truncar los datos al 98%, es decir, analizar de todas las medidas a que distancia máxima de error se encuentran el 98% de sus resultados. De esta forma se desechan puntos que pudiesen haber sido mal medidos, o incluso valores del exponente de pérdidas que son muy desfavorables.

En la siguiente tabla se observa el error máximo en la distancia para cada valor de “n”. Aquellos con una distancia de error más bajo presentarán mejores resultados.

N	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
Er	>15	>15	<14	<12	<9.2	<8.5	<8.5	<8.5	<9.2	<9.2	<9.8

Tabla 3: Error máximo de distancia en función del exponente de pérdidas

Como indica la tabla, tanto 2.5, 2.6 y 2.7 ofrecen la distancia de error más baja, por lo que cualquiera de ellos sería adecuado para realizar las medidas. En la Figura 13 se reducen los datos de la figura anterior, para mostrar con mayor detalle aquellos datos que muestran una mejor tasa en valores cercanos al cero.

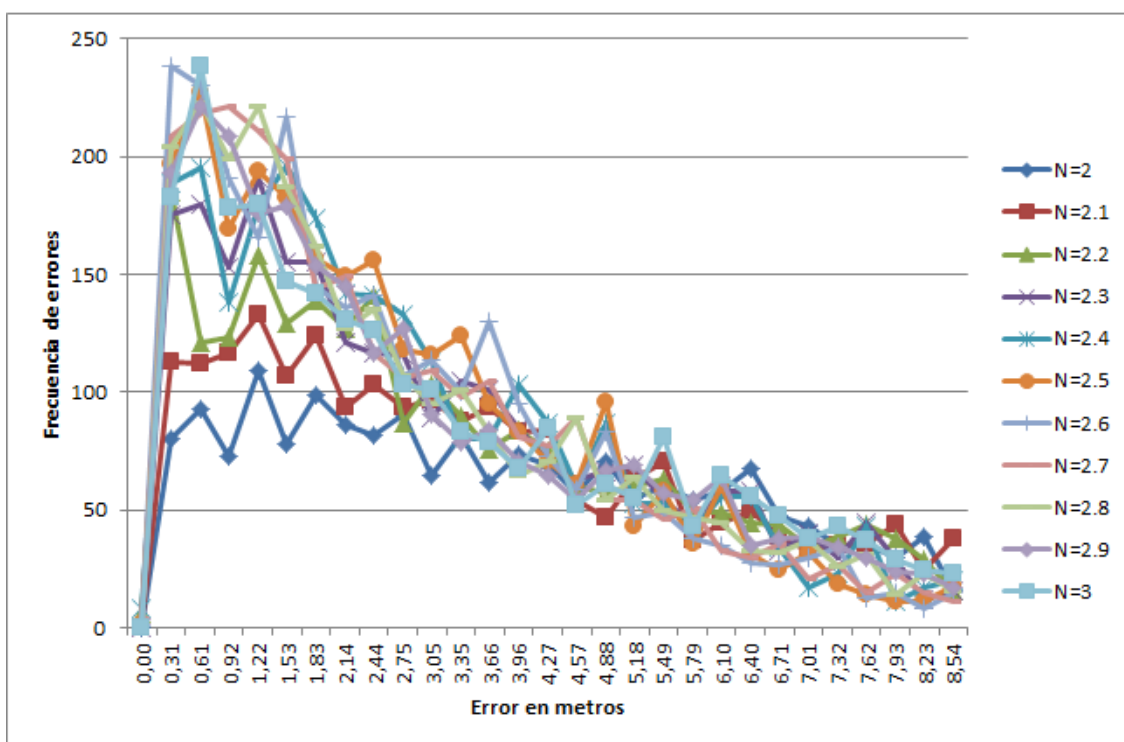


Figura 13: Histograma truncado al 98%

Tras analizar los datos de la tabla, se decidió que el valor que se emplearía como exponente de perdidas sería 2.7. Esta decisión se tuvo por ser el valor más próximo a la media, porque ni 2.6, ni 2.5 suponían apenas mejora en los resultados, y porque los cálculos ya se iniciaron previamente para este valor, por lo que se decidió continuar con ellos.

Conocido este valor, en la Figura 14 es destacable remarcar el histograma del sistema para un exponente de pérdidas de 2.7.

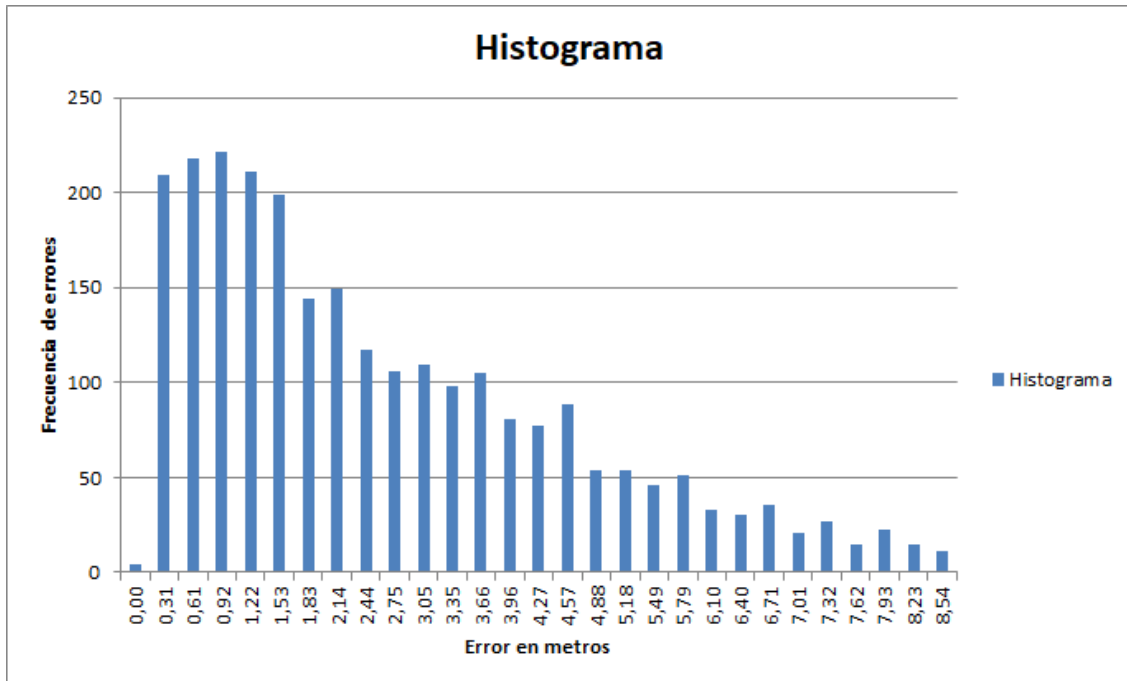


Figura 14: Histograma para un exponente de pérdidas de 2.7

En esta gráfica se puede apreciar como la mayoría de los errores se concentran en distancias inferiores a 3 metros, pero a pesar de ello, sigue encontrándose una cantidad significativa en distancias mayores. Al igual que la gráfica anterior, esta también fue truncada al 98% para descartar errores de medida que no afectan al sistema.

Situando el valor de n a 2.7, el siguiente paso consiste en obtener la distancia del dispositivo móvil a cada router. Para ello solo queda despejar la distancia de la ecuación 2, obteniendo de esta forma la siguiente expresión.

$$d = 10^{\frac{-(RSSI-A)}{10n}}$$

Ecuación 4: Cálculo de la distancia

Tras aplicar dicha expresión, ya se dispone de todas las distancias necesarias para aplicar el algoritmo de trilateración en cada punto.

4.2.2 Resultados de la trilateración

En este apartado se aplica el algoritmo de trilateración a cada uno de los puntos que se obtuvieron durante la campaña de medidas de los router tradicionales. Por ello, y a modo de referencia de cómo van a ser representados a partir de ahora en esta explicación, de cada uno de ellos se extrae una nube de puntos, que estarán marcados en rojo, donde teóricamente el algoritmo estima que se encontraba el dispositivo en ese momento. La posición real, será representada por un punto verde, de forma que, cuanto más cercanos se encuentren los puntos rojos al punto verde indicado, más precisa

Como ya se mencionó en la teoría, el algoritmo de trilateración emplea 3 ecuaciones no lineales para obtener dos incógnitas. Básicamente se utilizan dos de ellas para resolver el sistema y la tercera como referencia para elegir con cuál de los dos valores que arroja el sistema es preferible quedarse. En este caso se emplean las ecuaciones pertenecientes al router 1 y 2, mientras que el 3 es el empleado como referencia. Esta decisión no tuvo ningún criterio, simplemente se decidió probar por orden numérico.

The figure displays a scatter plot on a grid. The x-axis and y-axis both range from -4 to 16, with major tick marks every 2 units. A 7x7 grid of blue points is centered in the plot, spanning from x=2 to x=8 and y=1 to y=7. A black rectangle is drawn around a 5x5 sub-region of this grid, from x=2 to x=7 and y=1 to y=6. Inside this rectangle, there are several red points, one green point, and one yellow point. The points are distributed as follows:

- Blue points: A 7x7 grid from (2,1) to (8,7).
- Red points: Approximately 10 points clustered in the center of the 5x5 rectangle.
- Green point: One point located at approximately (4.5, 5.5).
- Yellow point: One point located at approximately (5.5, 5.5).
- Black points: Two points located at the corners of the 5x5 rectangle, at (2,1) and (7,6).

representa el punto $X=4$, $Y=7$, el cual

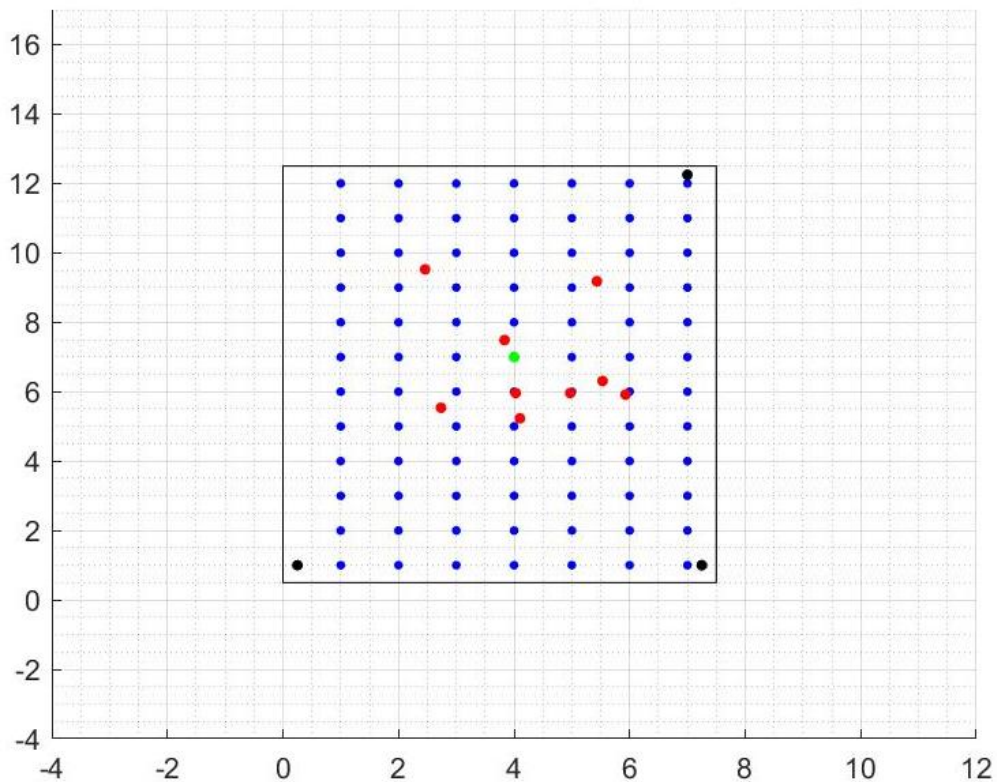


Figura 16: Trilateración RSSI X=4, Y=7

Esta dinámica se cumple en casi todos los puntos de la zona central en mayor o menor medida, con unos márgenes de error que no suelen pasar de los 4 o 5 metros. Pero no todos los resultados son tan positivos, existen ciertas zonas de la sala donde las prestaciones de los resultados descienden drásticamente. Los casos más notorios son las zonas próximas a las paredes, donde los puntos calculados ni se acercan a lo esperado. En la Figura 17 se observa el caso de estar en la zona central de la pared de la izquierda. En este caso la nube de puntos se concentra en la zona opuesta de la sala, lo cual no es para nada lo que se buscaba.

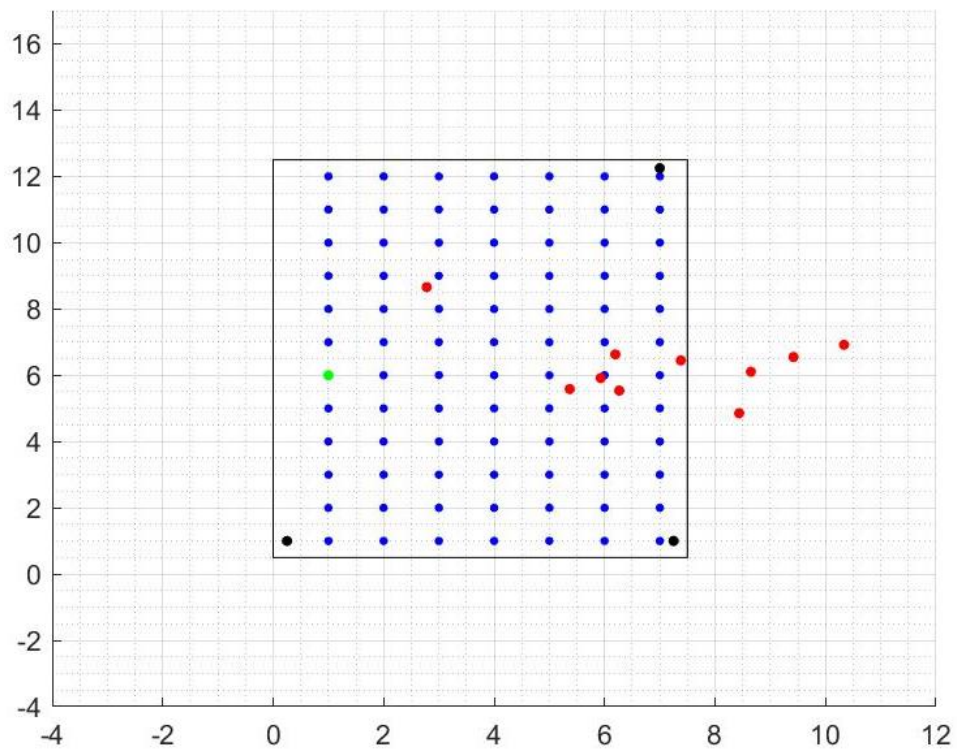


Figura 17: Trilateración RSSI pared izquierda

Esto sucede de manera similar en la pared de la derecha, sucediendo justamente lo contrario, como se aprecia en la Figura 18. En este caso algunos puntos se concentran algo más en la zona central, y no tanto en el extremo, lo cual, aun siendo malo, es una leve mejoría.

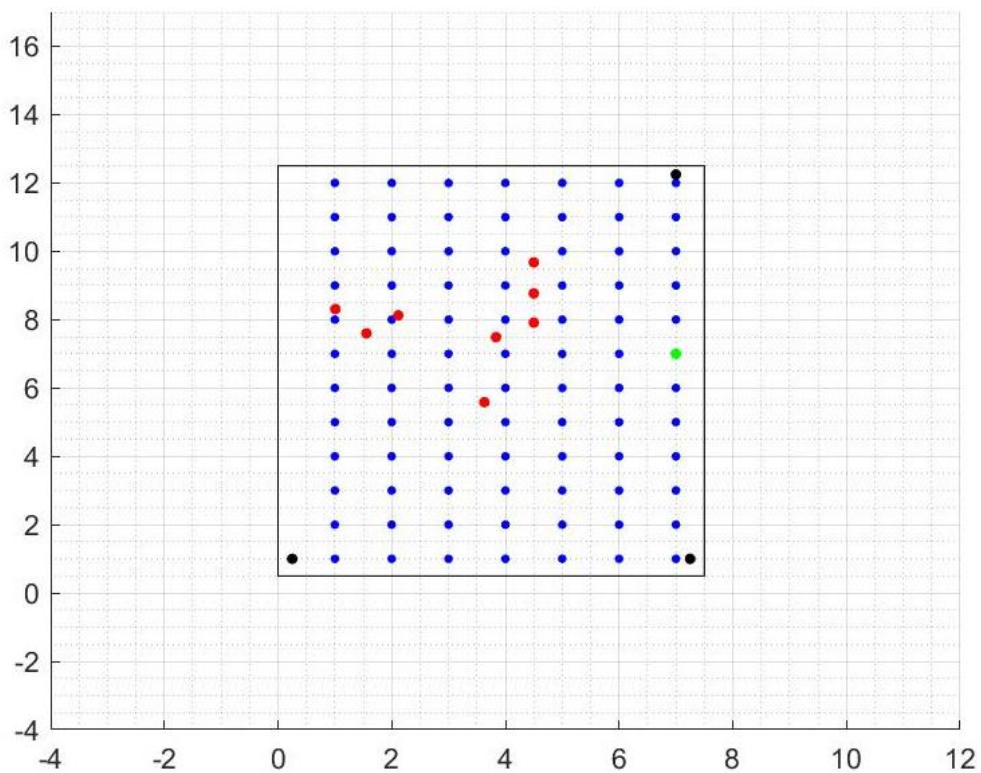


Figura 18: Trilateración RSSI pared derecha

En la parte inferior sucede algo curioso, y es que los puntos sí que tienden a concentrarse en zonas relativamente cercanas a la esperada. En la Figura 19 se puede observar este fenómeno.

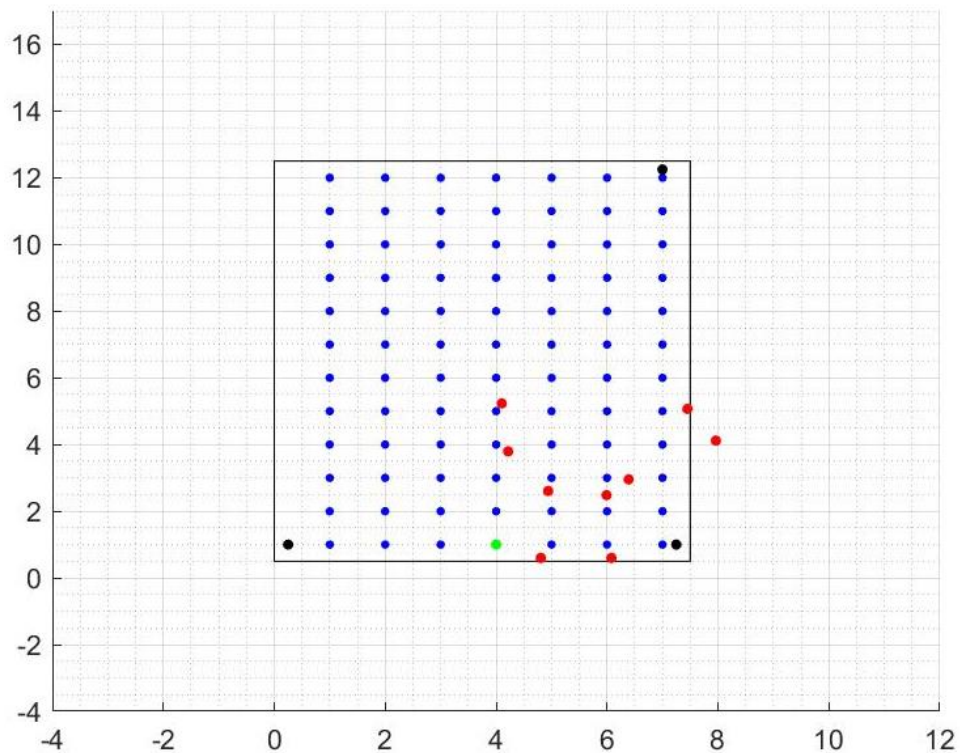


Figura 19: Trilateración RSSI pared inferior

Por el contrario, en la Figura 20 se puede apreciar la pared de la zona superior, donde existe una mayor dispersión por toda la sala y sin ningún criterio claro.

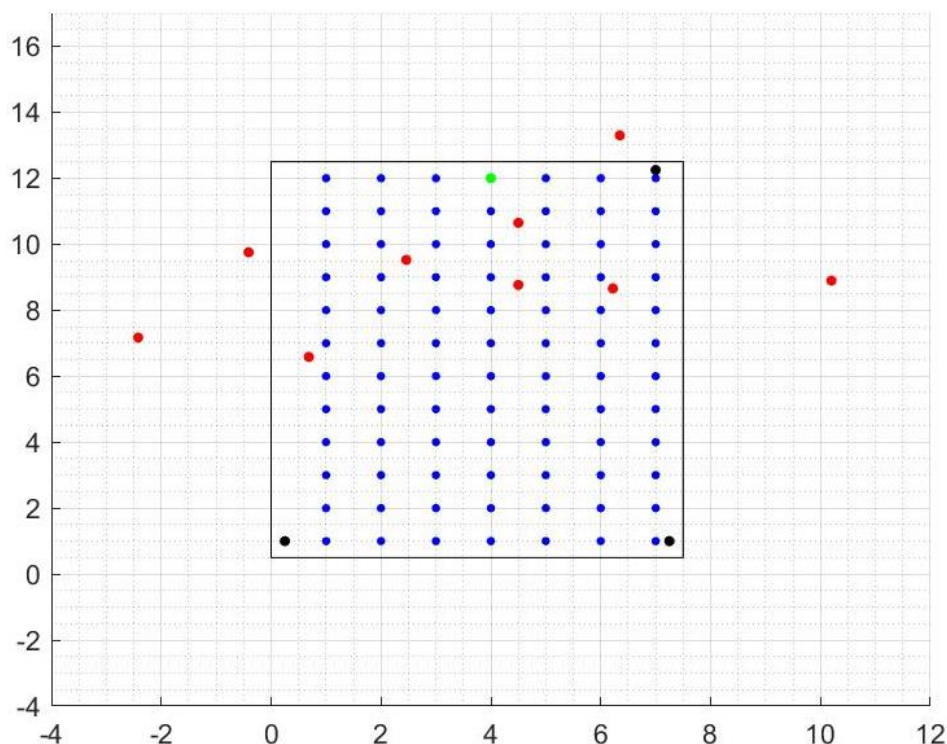


Figura 20: Trilateración RSSI pared superior

Con estos datos, sumados a los del resto de puntos, se puede deducir que los resultados en la zona central son bastante aceptables, aunque la precisión puede variar desde apenas medio metro, hasta unos 5 metros dependiendo del caso. Por el contrario, si el punto se encuentra cercano a las paredes los resultados son muy desfavorables. Esto se puede deber a diversos motivos como la lejanía a algunos de los router o efectos de multicamino e interferencia introducidos por las señales reflejadas en las paredes. A pesar de que en todos ellos los resultados no son los esperados, sí que se puede intuir una regla. En aquellos puntos que se encuentran dentro del triángulo que forman los 3 router, especialmente aquellos próximos a los 2 utilizados en las ecuaciones, sí que es cierto que tienden a acercarse más al punto deseado, mientras que los que se encuentran fuera del triángulo presentan localizaciones completamente erráticas.

Los resultados son similares a los que se han estado obteniendo en los trabajos previos al que nos ocupa, por lo que se puede concluir que las nuevas medidas pueden ser utilizadas como referencia para continuar con el estudio de las señales 802.11mc.

4.3 Estudio con RTT

En esta parte del proyecto se analiza la opción wifi que se plantea como la futura alternativa a la localización en interiores. El proceso empleado es similar al del apartado anterior, con la diferencia de que la aplicación móvil es capaz de extraer directamente una estimación de la distancia a cada router wifi, a partir del tiempo de ida y vuelta (RTT).

Como la distancia es conocida gracias a la propia aplicación y no es necesario extraerla a partir de expresiones, se puede comprobar directamente cuánto error introduce el uso de esta estimación. La comparación con las distancias reales sobre el plano permite obtener la gráfica de la Figura 21. A esta gráfica se le ha aplicado el truncamiento del 98% para descartar los posibles errores de medición.

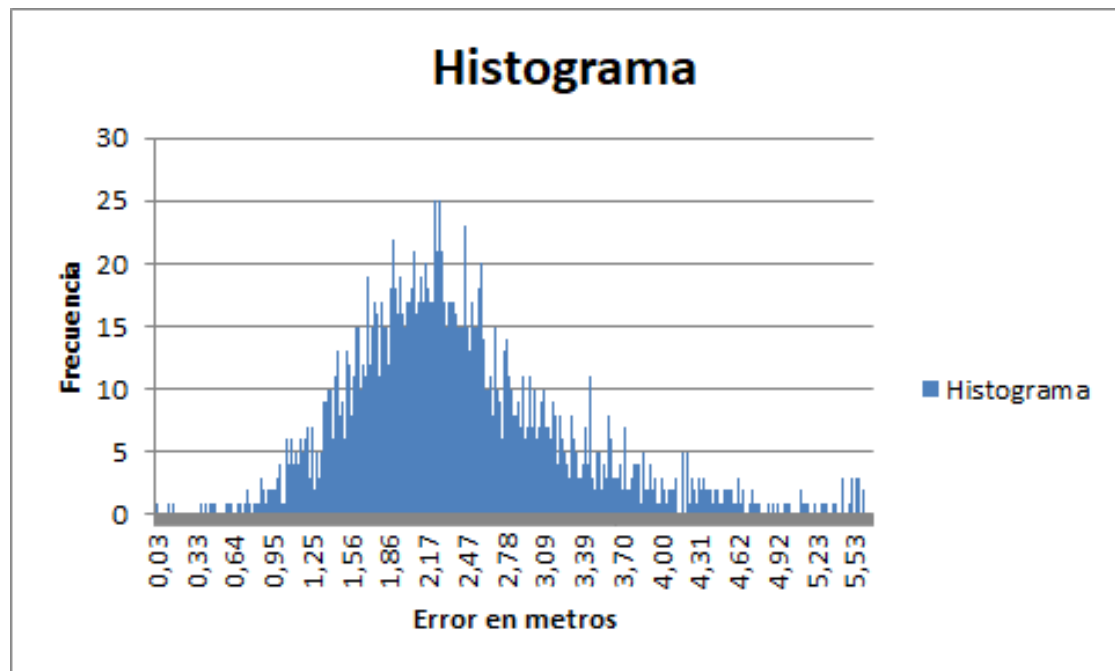


Figura 21: Histograma RTT

En la imagen se aprecia que los errores forman una campana de Gauss con media en torno a 2 metros. Algo muy distinto de lo que se había observado hasta entonces. Analizando los errores que introducían con respecto a lo esperado se observó que el sistema introducía un error por exceso cercano a los 2 metros, como se aprecia en la gráfica. Se desconoce cómo el sistema puede generar un error tan sistemático, muy probablemente originado por el método de estimación utilizado, pero a la vista de los resultados, es fácilmente corregible corrigiendo esta distancia a cada uno de los valores que genera la aplicación.

Con estas nuevas distancias se repite el histograma, con su respectivo truncamiento del 98%, dando lugar a la gráfica que se muestra en la Figura 22.

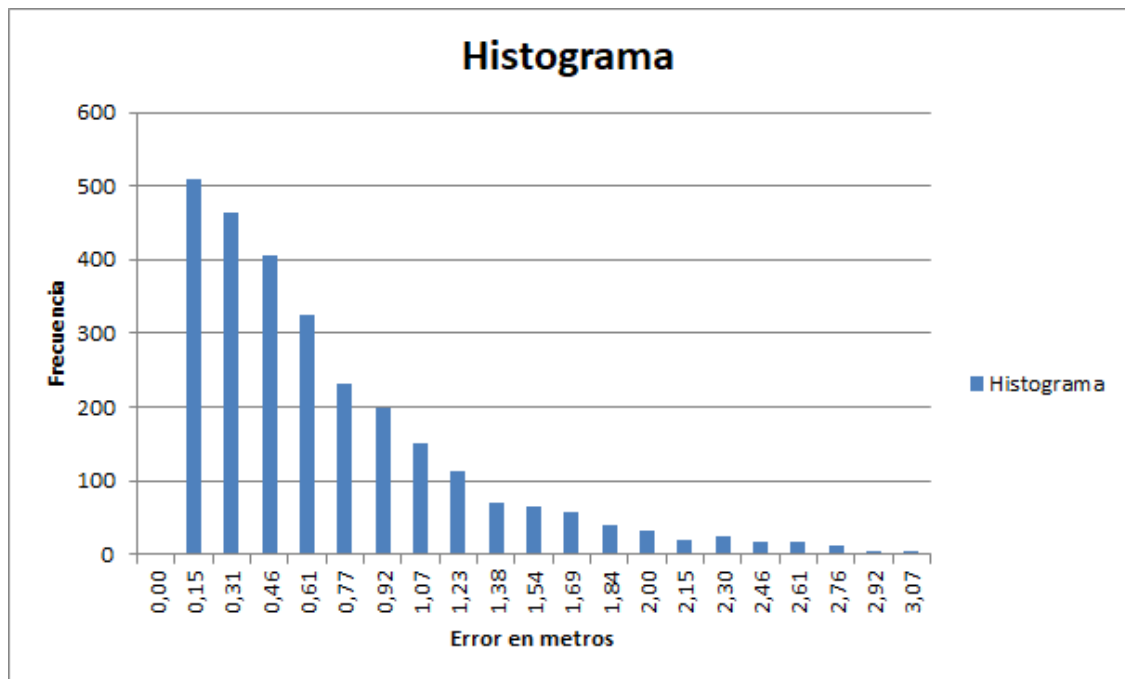


Figura 22: Histograma con la corrección de 2 metros

En la gráfica se puede apreciar que, al reducir esa distancia, el error medio está muy próximo a 0 en la mayoría de los casos, por lo que los resultados debieran ser más próximos a los valores reales.

Si se hace una comparativa rápida entre el histograma de la Figura 14, perteneciente al sistema RSSI, y el de la Figura 22, correspondiente al sistema RTT, se puede apreciar una clara mejoría en este último, congregando la mayoría de sus errores en valores inferiores al metro y medio, cuando en el caso anterior la curva congregaba bastantes errores en distancias cercanas a los 4 metros. Así mismo es importante recalcar que en el histograma del sistema RTT la frecuencia de error decae bruscamente según se aleja del cero, pero en el caso del RSSI, esta caída es mucho más progresiva, indicando que existe una mayor tasa de error en la localización tradicional.

4.3.1 Resultados trilateración RTT

En este apartado se analiza la aplicación del algoritmo de trilateración, de la misma forma que en el caso tradicional, pero con sus respectivas distancias. Al igual que en el caso anterior, se mostrarán y explicarán los casos más reseñables. Todas las demás capturas se muestran en el Anexo 2.

Algunos de los resultados más favorables se observan en la Figura 23, donde el punto X=3, Y=7 posee una nube de punto casi superponiendo lo esperado, con casi todos ellos a una distancia inferior a 1 metro. Un resultado realmente positivo.

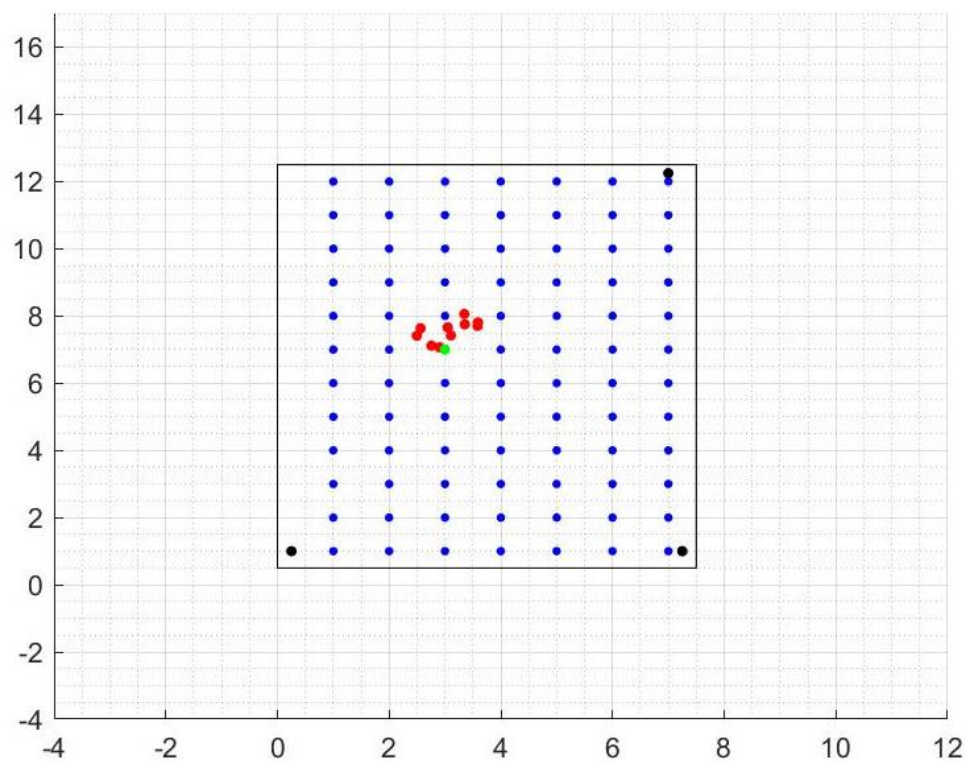


Figura 23: Trilateración RTT $X=3$, $Y=7$

Como se puede apreciar, en la Figura 24 también existe una nube de puntos muy próxima al punto deseado. Puesto que el margen de precisión de este sistema ronda los 2 metros son ejemplos de localización óptimos.

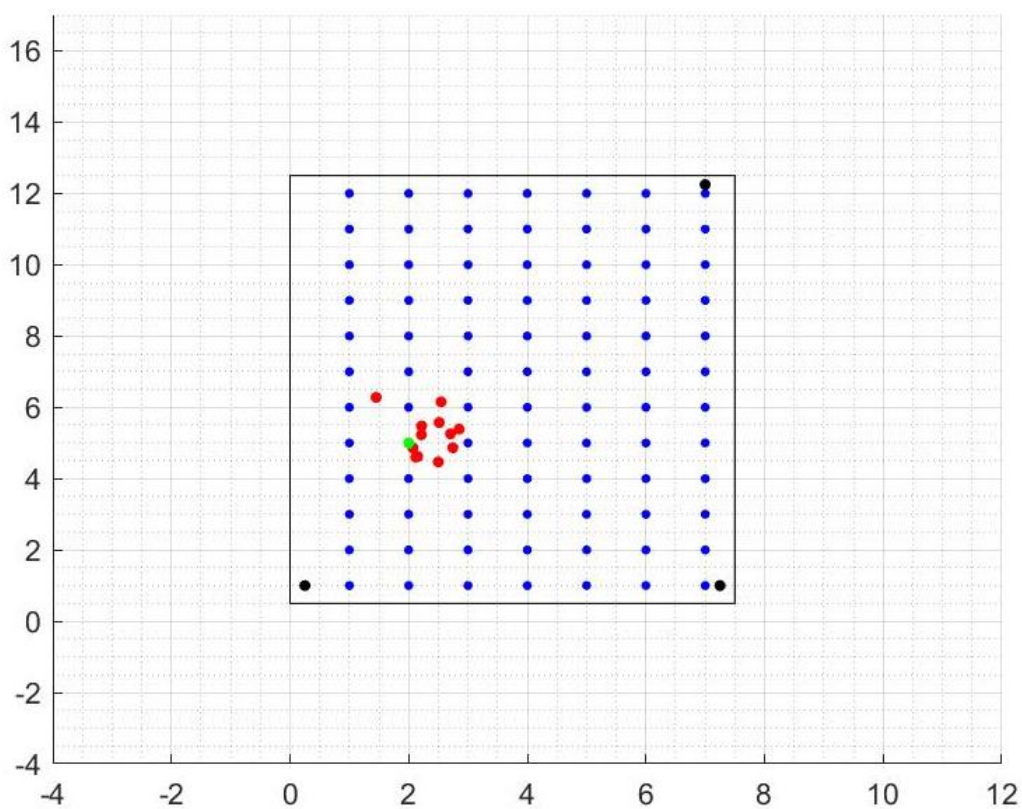


Figura 24: Trilateración RSSI $X=2$, $Y=5$

Las zonas centrales presentan una precisión significativamente superior a las del caso del RSSI, pero este sistema también se ve fuertemente afectado por fenómenos de reflexión y multicamino cuando el dispositivo móvil se encuentra cerca de las paredes. A pesar de ello es capaz de ofrecer resultados bastante óptimos cuando la pared no se encuentra alejada de los dos router de referencia (en este caso el 1 y el 2, ambos ubicados ambos cerca de la pared inferior). La Figura 25 muestra un ejemplo de posicionamiento en la pared inferior, donde los resultados son bastante cercanos a lo esperado, aunque no tan ideales como en la zona central.

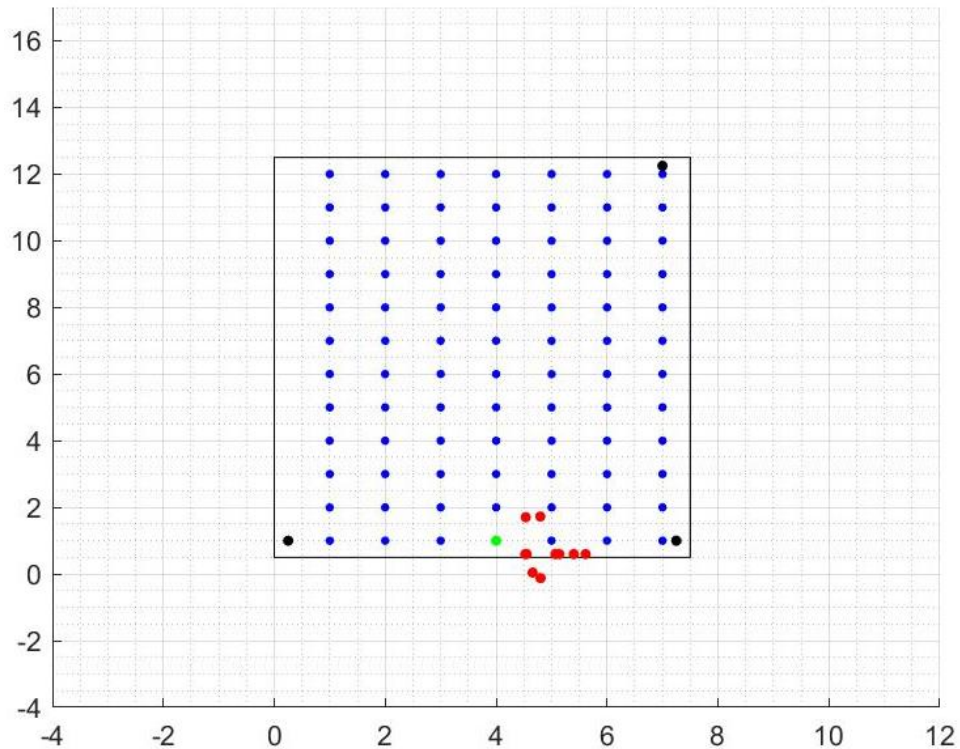


Figura 25: Trilateración RTT pared inferior

En la Figura 26 se refleja una captura de la pared de la izquierda de la sala donde existe una ligera dispersión, pero los puntos se encuentran muy próximos al valor esperado.

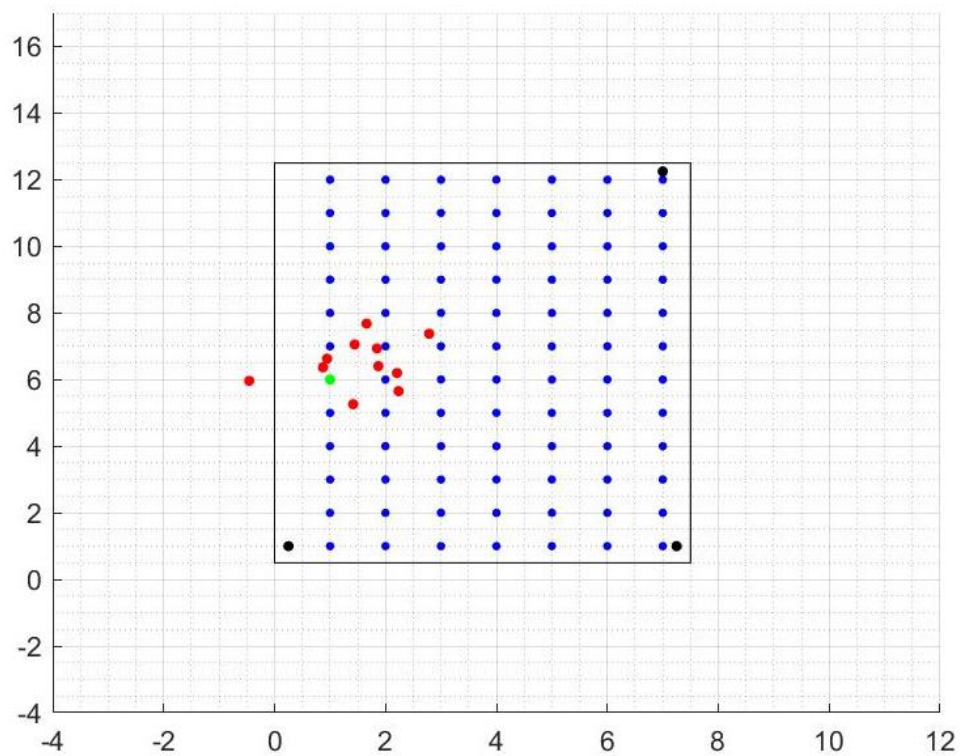


Figura 26: Trilateración RTT pared izquierda

En la Figura 27 se muestra la pared de la derecha, donde la situación es muy similar al caso anterior, presentando unos resultados igualmente aceptables.

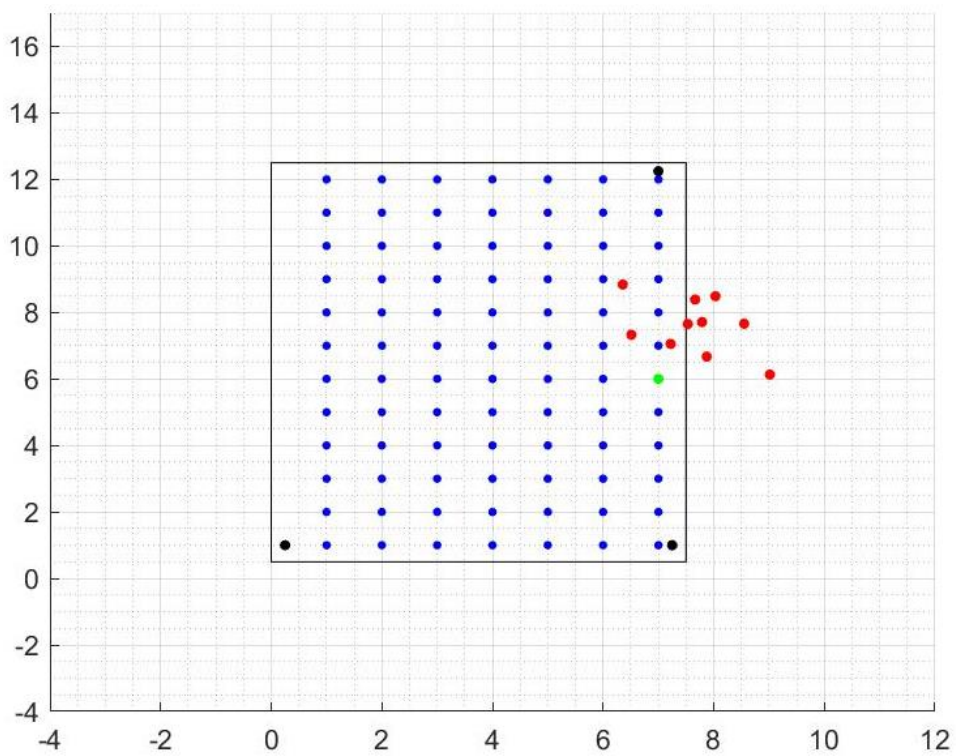


Figura 27: Trilateración RTT pared derecha

Viendo estos datos podría parecer que los datos son muy positivos en todos los casos, de hecho, ya son mejores que en el caso del wifi tradicional. A pesar de

ello, también existe una zona donde los resultados son muy desfavorables, puesto que en la pared de la zona superior los puntos salen de la sala y presentan una dispersión muy significativa. En la Figura 28 se observa un ejemplo de esta situación.

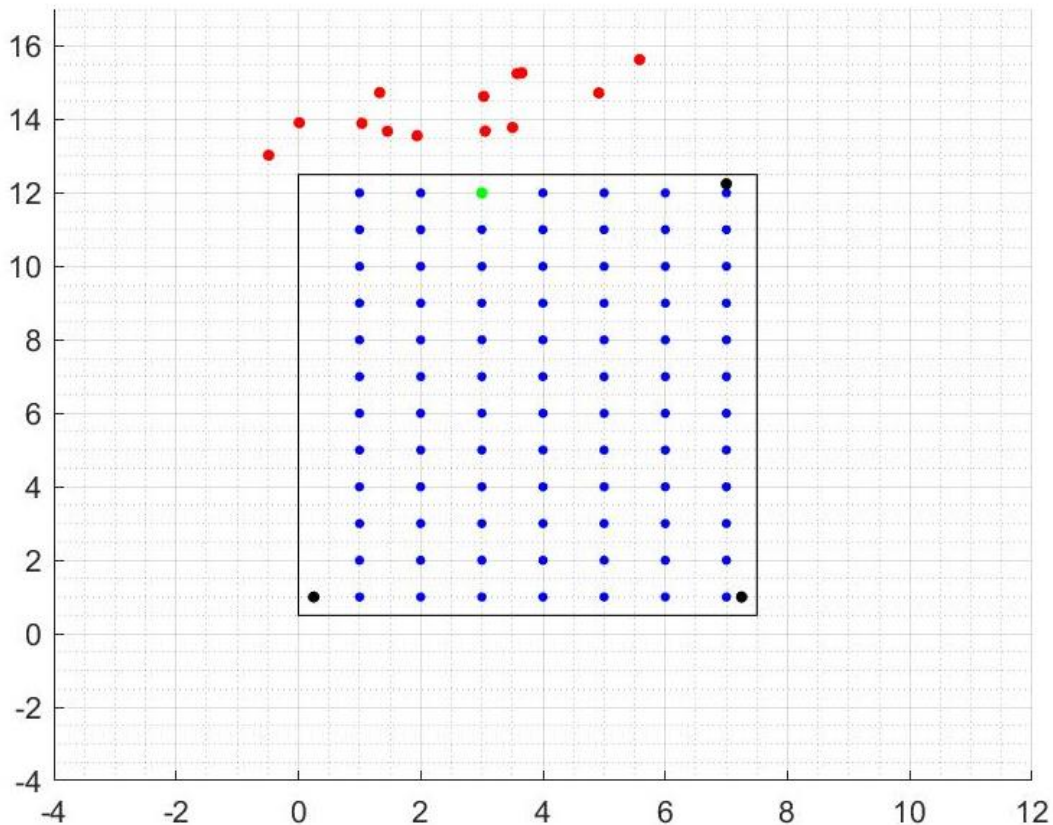


Figura 28: Trilateración RTT pared superior

Al igual que sucede con el wifi tradicional, este sistema también se ve afectado por fenómenos de reflexión y multicamino. El hecho de que los resultados más desfavorables se encuentren en una sola pared puede ser indicativo de que el algoritmo de trilateración puede afectar a la forma en la que se devuelven las posiciones. Casualmente los resultados más desfavorables se encuentran en la pared opuesta a la que se encuentran los dos routers de referencia, por lo que da a entender que puede afectar cuales se elijan a la hora de aplicar el algoritmo.

También es cierto que, al igual que en el uso de la RSSI, los peores resultados se corresponden con posiciones exteriores al triángulo definido por las trayectorias entre los router, lo cual tendría que tenerse en cuenta para próximos estudios o incluso la aplicación de esta metodología.

4.4 Análisis de errores

Como se ha visto previamente, en ambos estudios se calculó el error absoluto de todas las distancias obtenidas durante la campaña de medidas, En los dos casos se introduce un error significativo cuando la posición del dispositivo móvil se encuentra próxima a las paredes. En el caso tradicional es muy notorio este

error en cualquiera de ellas, pero en el RTT solamente la pared más alejada de los router introduce un error tan brusco.

Ambas tecnologías funcionan, ofreciendo la alternativa RTT un mejor resultado en la mayoría de las situaciones. Una mejora de los errores de RTT se consiguió al reducir en 2 metros el exceso en distancia que aportaba la aplicación móvil. Por ello se decidió emplear el mismo método en algunos casos de RSSI para observar su comportamiento, y de esta forma intentar extraer alguna conclusión a esos posibles fallos. En la Figura 29 se puede apreciar un esquema de la posición $X=4$, $Y=7$, en la que se han hecho sucesivas reducciones en la distancia, siendo los círculos magentas la posición original, los amarillos una reducción de medio metro, los negros un metro, los azules un metro y medio, y finalmente los rojos dos metros.

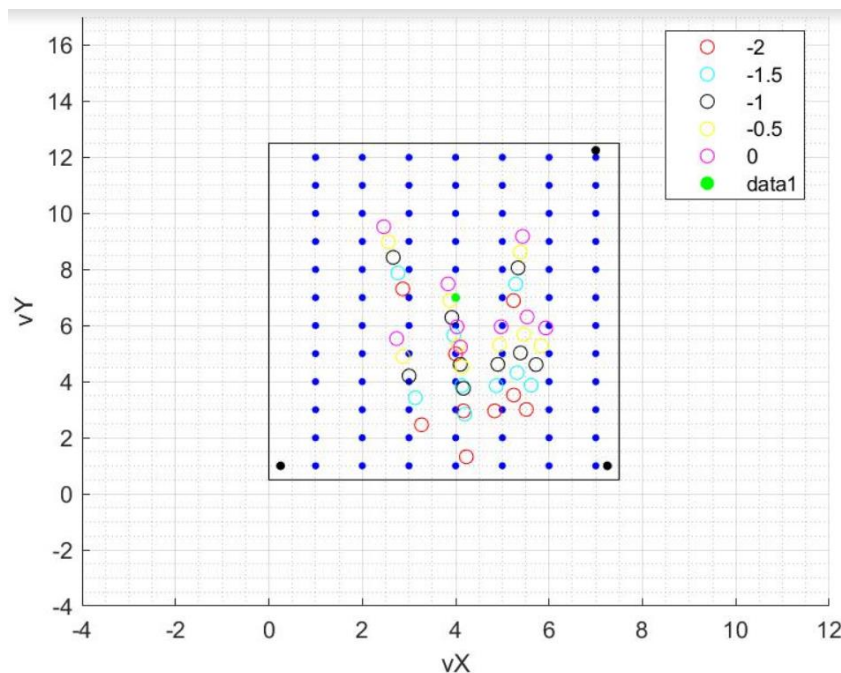


Figura 29: Resultados RSSI con variación en la distancia

Al ver esta captura se observó que los sucesivos círculos trazan una recta cuya progresión llega a la recta que une los router 1 y 2, los cuales forman los APs de referencia para la trilateración. Este comportamiento se repetía en los diversos casos en los que se probó esta modificación independientemente del punto que se eligiera. En la Figura 30 se han trazado con rectas las trayectorias de los puntos para observar, en otro caso más desfavorable, el mismo comportamiento que sucedía en el anterior.

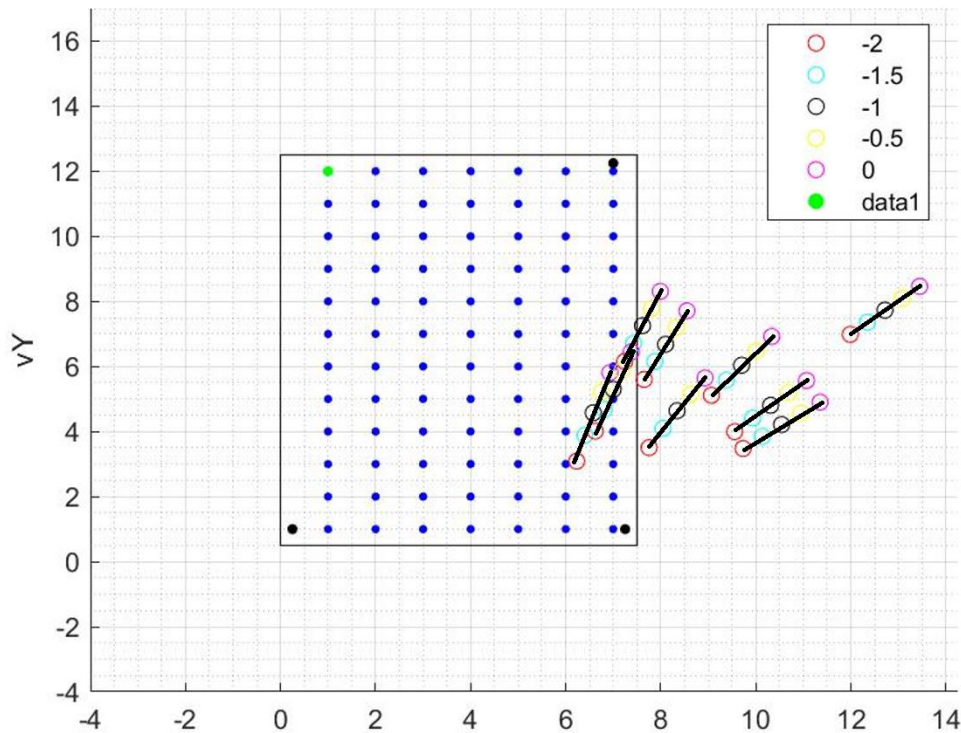


Figura 30: Resultado RSSI desfavorable con trazado de líneas

Como se observa en la figura anterior, el punto $X=1$, $Y=12$ presenta posiblemente el caso más desfavorable posible, teniendo unos resultados muy alejados de lo esperado y sin aparente mejora con correcciones en la distancia. Por ello este punto fue el elegido para realizar un análisis más detallado al respecto.

4.4.1 Replanteamiento del algoritmo de trilateración

Al observar que las trazas de estos puntos tendían a extenderse hasta la recta que conecta el router 1 con el 2, se decidió recalcular la trilateración empleando en un caso el 2 y el 3 como referencia, y en otro caso empleando el 1 y el 3 como referencia, para poder observar si el algoritmo de trilateración y la forma en la que se toman las decisiones tiene un gran impacto en los resultados. Ambas pruebas se hicieron para el punto (1,12) por ser el más desfavorable.

En primer lugar, se decidió que los APs 1 y 3 fuesen los principales que forman la ecuación y el 2 fuera el que permite decidir entre los dos resultados que arroja el sistema. Al calcular la trilateración en este caso se observó que los resultados seguían siendo igualmente nefastos, pero bien es cierto que la dirección de la traza de los puntos tendía a acercarse al centro de la sala, es decir, a la recta que unía el router 1 con el 3. En la Figura 31 se puede observar lo anteriormente mencionado.

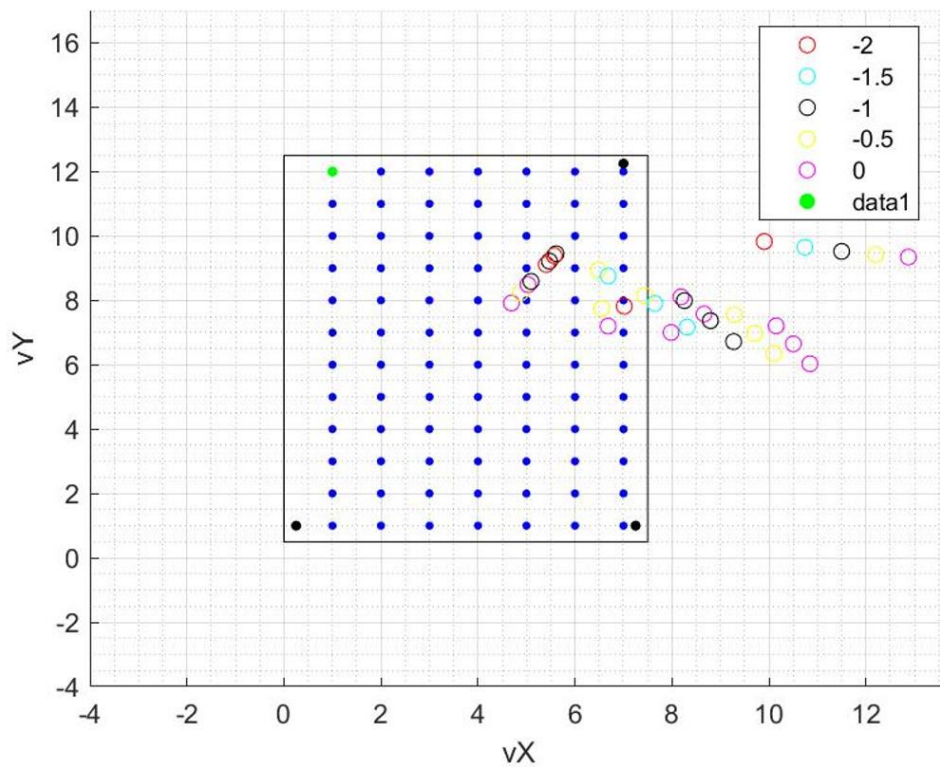


Figura 31: Resultados RSSI con R1 y R3 como referencia

Lo mismo se hizo al emplear los router 2 y 3 como referencia, lo cual generó unos resultados aún más contradictorios, mostrando un gran agrupamiento de puntos en la zona próxima a la pared de la derecha. En la Figura 32 se observa este fenómeno.

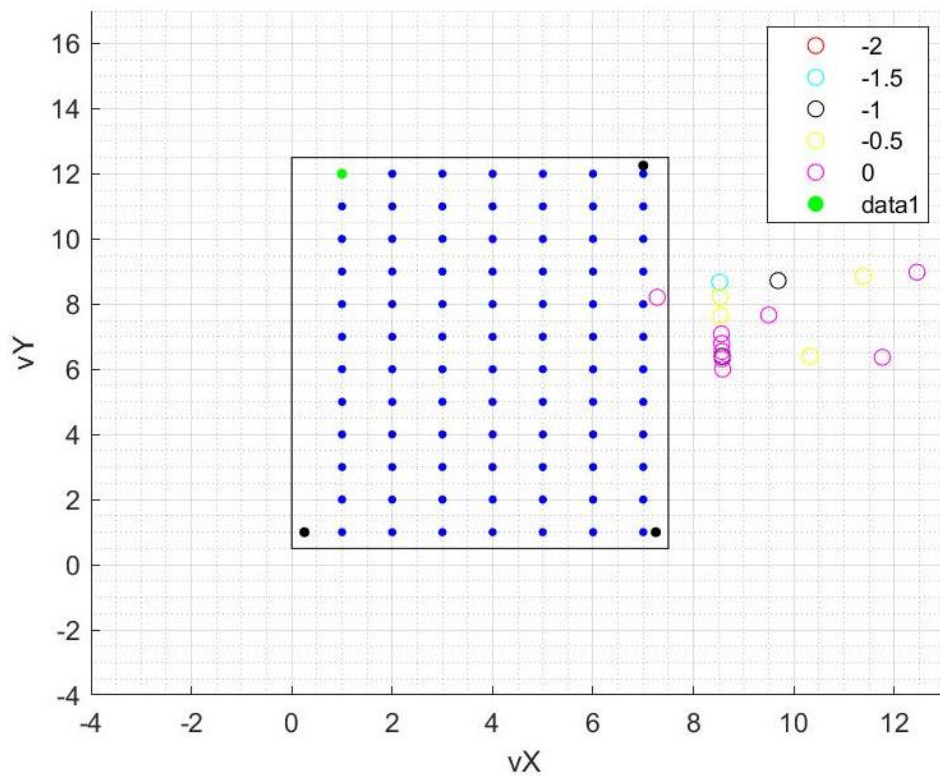


Figura 32: Resultados RSSI con R2 y R3 como referencia

Al observar todos estos datos se planteó que el algoritmo pudiera estar mal programado, pero al comprobar con medidas reales, las posiciones eran exactas, lo que descartaba esta alternativa.

4.4.2 Replanteamiento de las distancias

Visto que el algoritmo era correcto, la otra alternativa era suponer en cada caso, que la medida a uno de los router fuese la exacta, mientras que las otras dos fueran directamente las calculadas, y de esta forma observar si alguno de los APs estaba deteriorando los resultados de alguna forma. Al aplicar esto, decidiendo que las distancias al router 1 fueran las reales, los resultados fueron igualmente nefastos. Al hacerlo con el router 3 sucedió lo mismo. Pero esto cambió cuando se decidió introducir las distancias reales al router 2. En la Figura 33 se observa que al forzar que la distancia al router 2 fuera la real, la trilateración generaba la nube de puntos muy próxima al punto deseado, lo que podría indicar que el problema fuera que el punto (1,12) estuviera en un rango demasiado alejado para el router 2. Este caso se hizo empleando el router 1 y 3 como referencia y el 2 como decisor.

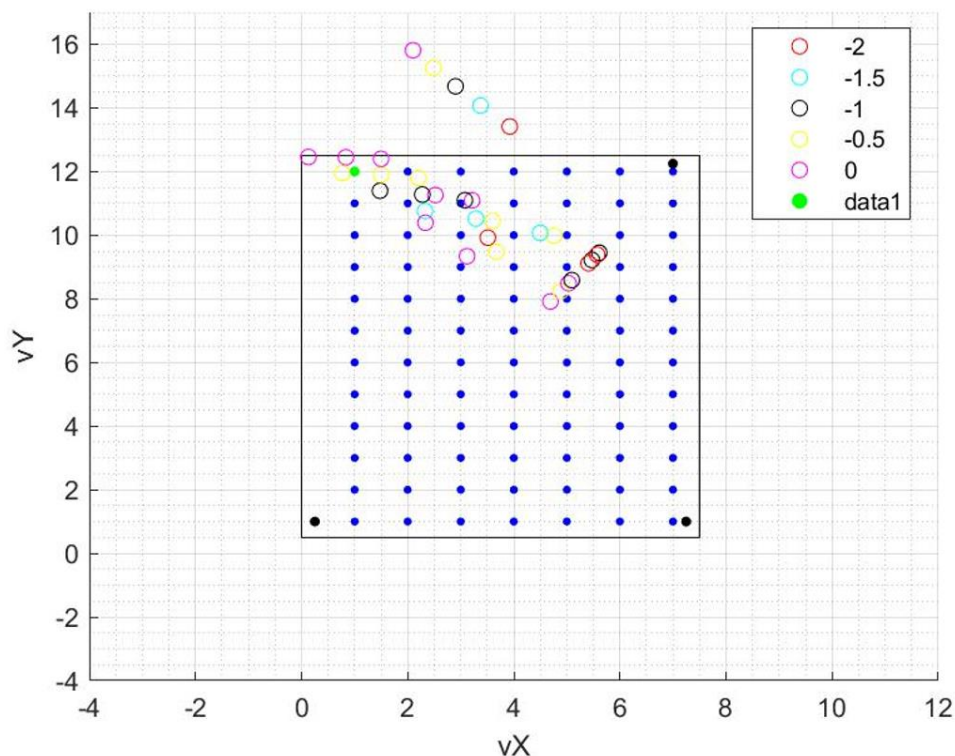


Figura 33: Resultados RSSI con R1 y R3 como referencia, siendo d2 real

Para comprobar que esto no era un hecho aislado, se repitió la prueba haciendo que el router 2 y 3 fueran los de referencia, y el router 1 el decisor. En este caso sucedió exactamente lo mismo. Si se introducían las distancias reales del router 1 o del 3 los resultados eran muy desfavorables, pero al introducir la distancia real al segundo AP, los resultados cambiaban drásticamente. En la Figura 34 se puede apreciar que la nube de puntos, cuando la distancia al router 2 es la real, está muy próxima a lo esperado.

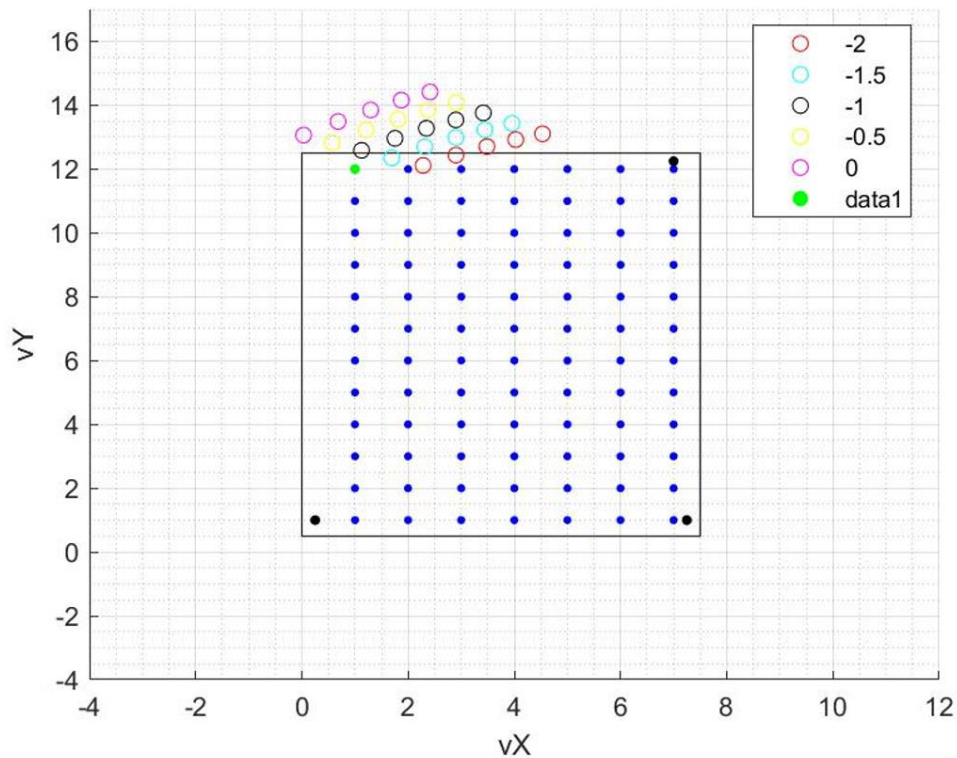


Figura 34: Resultados RSSI con R2 y R3 como referencia, siendo d2 real

Viendo toda esta información se puede suponer que el hecho de que el punto (1,12) sea el más alejado al router 2 hace que exista una gran pérdida de potencia. Esta pérdida genera una distancia muy desfavorable, al realizar el cálculo en base a este parámetro.

4.4.3 Replanteamiento de las posiciones

El último parámetro que se decidió comprobar para corroborar que todo estaba debidamente calculado y no había errores de medición, era la posición relativa de los router. Al volverlo a medir se observó que existía una pequeña deriva en las posiciones de los router con respecto a lo que se planteó previamente, por lo que se modificaron las ligeras variaciones de las posiciones en el algoritmo y se volvió a calcular la trilateración para algunos casos. En la Figura 35 se observa el cálculo de la trilateración para el punto (1,12) después de esta modificación.

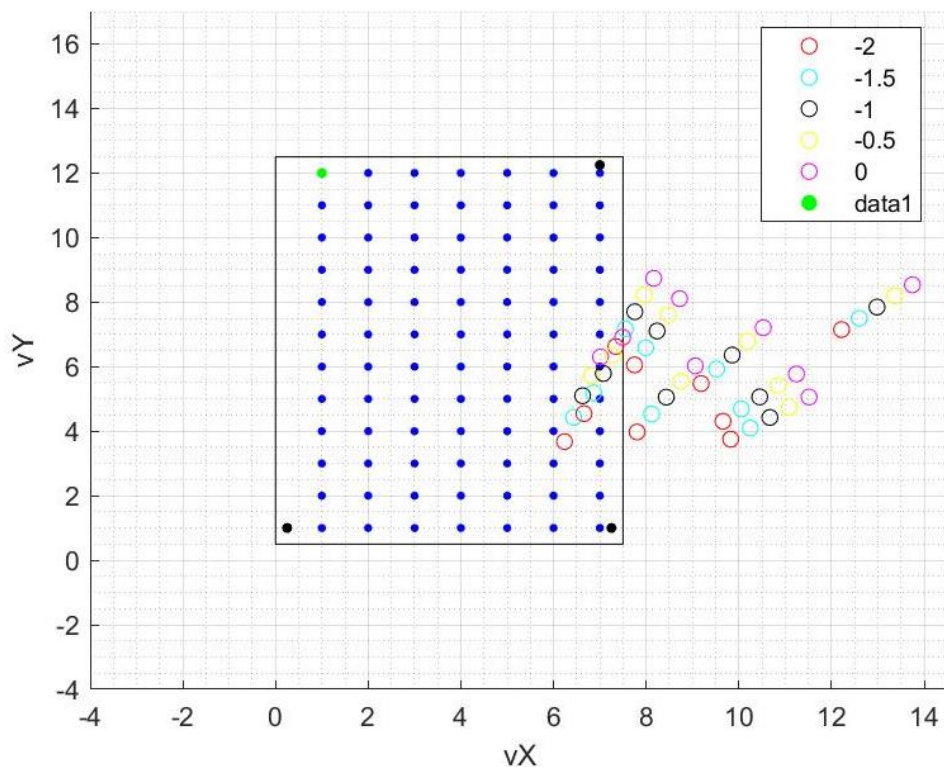


Figura 35: Resultado RSSI tras cambiar las posiciones de los APs

Si se compara la Figura 35 con la Figura 30, apenas son apreciables las diferencias entre una y otra. En todos los casos en los que se probó las medidas diferían en unos pocos centímetros que no afectaban en mayor medida a las conclusiones del proyecto. Por esto, se decidió mantener lo que ya se tenía calculado.

4.4.4 Análisis de errores final

Tras conocer todas estas comprobaciones de errores, se pueden extraer algunas pequeñas conclusiones sobre qué aspectos pueden introducir error en las medidas.

Como ya se indicó previamente, la proximidad a las paredes altera mucho las medidas, por lo que los fenómenos de reflexión y multicamino son las principales causas que introducen error.

El algoritmo de trilateración también puede jugar un papel importante, puesto que al tener que decidir qué APs serán los que participen directamente en el sistema de ecuaciones, puede afectar en mayor medida a la precisión de las muestras.

Uno de los aspectos más drásticos ha sido la distancia del punto de medida al router, puesto que una mayor distancia implica un deterioro en la señal muy grande, y por tanto una pérdida de precisión que afecta enormemente al sistema. Reduciendo las distancias máximas a los router, o bien introduciendo router adicionales que permitan tener siempre al menos 3 en distancias

aceptables, podría suponer una mejora significativa de los resultados del posicionamiento.

Además, se ha comprobado que la exactitud en la posición relativa de los router no es un parámetro que influya decisivamente en los cálculos, a diferencia de la disposición relativa entre los router, que sí que afecta de forma significativa.

Para concluir, en el caso del estudio con los puntos de acceso compatibles con RTT, no se incluyeron correcciones de errores más allá de la reducción de 2 metros en las distancias de cada punto, porque ya presentaban unos resultados bastante satisfactorios, a excepción del error que se produce en la pared superior. En el caso de dicho error, se deja abierto para futuras investigaciones donde se puedan añadir más router RTT y así incluir la posibilidad de cambiar los APs de referencia de forma dinámica para optimizar los resultados en cualquier punto. Estas dos recomendaciones son aplicables a ambos sistemas.

5. Conclusiones y líneas futuras

En este apartado final se comentan las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto y las posibles mejoras que se podrían incluir en un futuro.

5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado y desarrollado una alternativa reciente al problema del posicionamiento en interiores, basada en un estándar que irá siendo cada vez más normal que aparezca en los dispositivos WIFI que se desplieguen.

Para poder realizar un análisis coherente, primero ha sido preciso preparar un escenario donde llevar a cabo las pruebas, tanto de las nuevas medidas, como de las medidas del método de referencia, así como desplegar todo un sistema a medida para recabar toda la información necesaria.

El nuevo método de cálculo de posición ha sido comparado con los resultados de utilizar directamente la potencia de la señal, ya que se hace uso de la estimación directa que hace el estándar 802.11mc, simplificando el proceso de cálculo.

Como principal conclusión se puede extraer que, efectivamente, la tecnología RTT se presenta como una alternativa real, que ofrece una mayor precisión y fiabilidad a la hora de localizar un dispositivo en interiores.

A pesar de ello, esta tecnología sufre de los mismos problemas que sus antecesoras. Se ve fuertemente afectada por fenómenos de multicamino e interferencia al acercarse a grandes objetos como puedan ser las paredes, y también se ven deteriorados los resultados por la lejanía con respecto de los puntos de acceso.

Además, el despliegue de los dispositivos utilizados como referencia es un factor clave, que debe ser estudiado con anterioridad de poder poner en práctica este método, o al menos, debe ser tenido en cuenta, ya que los resultados dependerán enormemente del entramado final de dicha malla de referencia.

Esto permite extraer, a modo de finalización, que el estándar 802.11mc es una alternativa más viable, pero no la solución definitiva, por lo menos de momento, para el cálculo de posiciones en escenarios interiores.

5.2 Líneas futuras

Este proyecto ha arrojado mucha información de gran utilidad y con ello varias vías de investigación. Algunas de las opciones que se podrían abordar en un futuro son las siguientes.

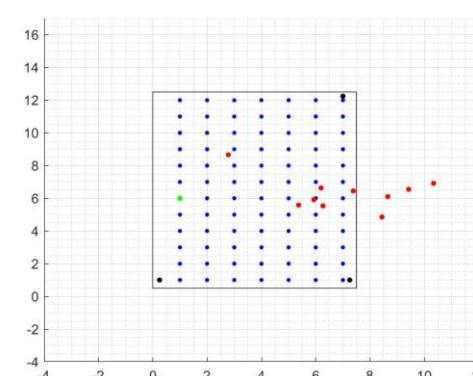
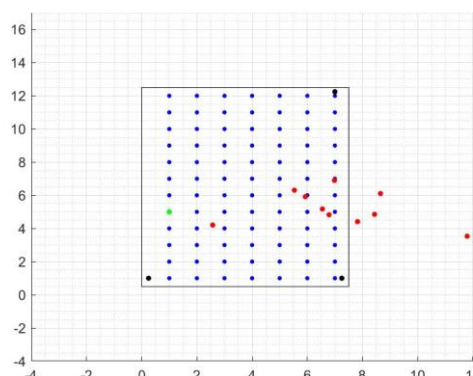
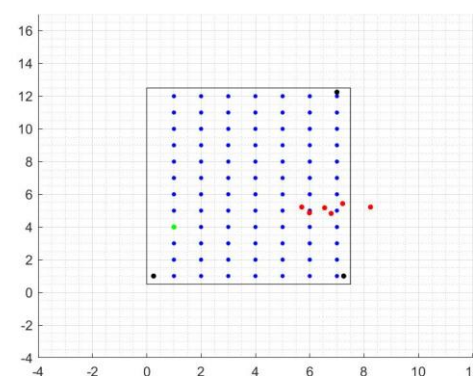
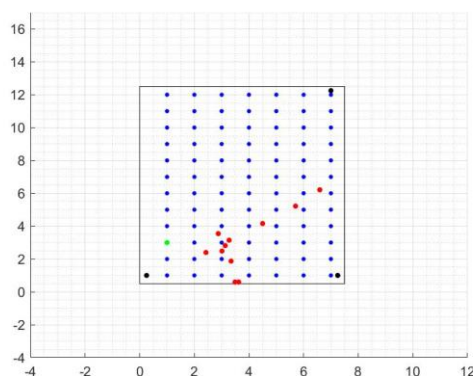
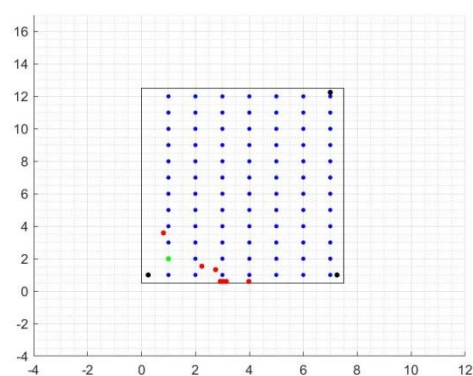
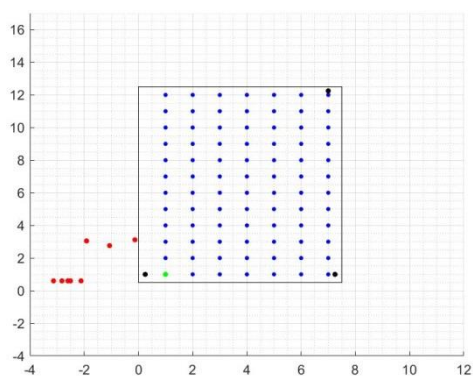
- Probar el sistema RTT en otros entornos, con un mayor despliegue donde existan varias salas y geometrías diferentes. De esta forma se podría analizar su comportamiento en un entorno más realista, e incluso arrojar luz sobre si los deterioros en la precisión de la señal pueden llegar a ser corregibles.
- En la misma línea al caso anterior, pero desde un punto de vista más físico, podría ser interesante realizar un estudio detallado de los efectos del multicamino y reflexión, para poder caracterizar de una forma más realista el cálculo de la distancia en función de las potencias recibidas.
- Como ya se indicó en el capítulo anterior, añadir un router más en la esquina superior izquierda, así como la posibilidad de asignar dinámicamente los APs de referencia podría suponer una mejora muy sustancial en la precisión. Esto abre la posibilidad de iniciar otros trabajos fin de grado de forma inmediata, que tengan en cuenta esta modificación del escenario.
- Por último, y ya desde el punto de vista de la experiencia de usuario, otra opción de desarrollo sería la de ofrecer un valor añadido a la app móvil que ya está desarrollada actualmente, permitiendo al usuario ubicarse en tiempo real, o con poco retraso, en su propio dispositivo móvil, evitando así el tener que exportar los datos a los programas de Matlab.

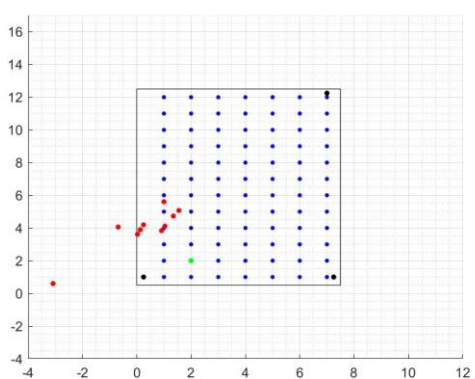
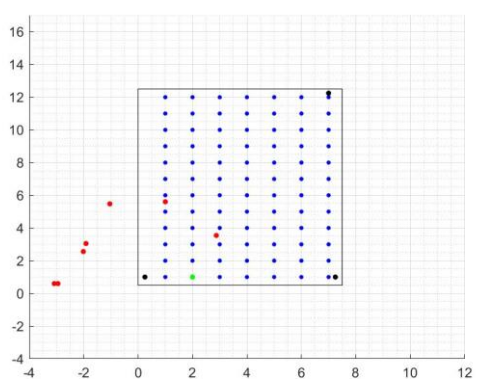
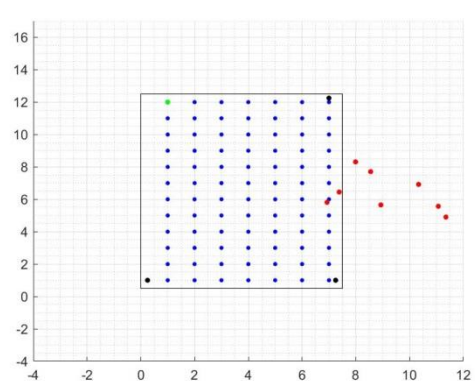
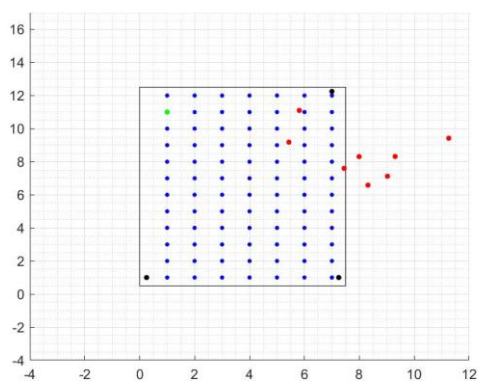
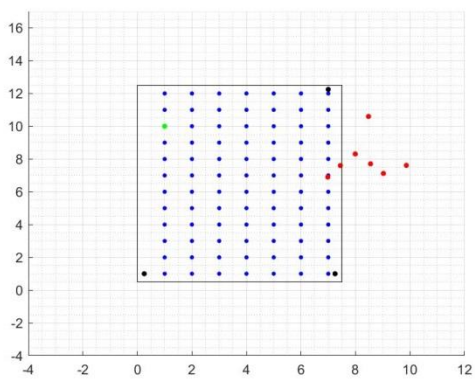
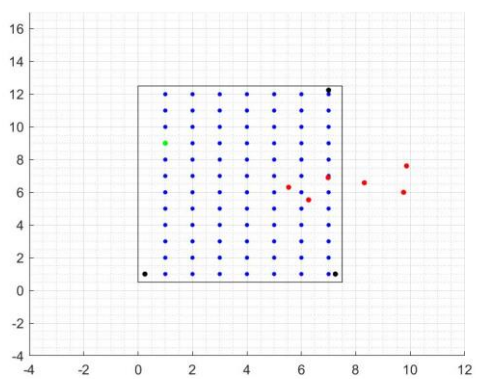
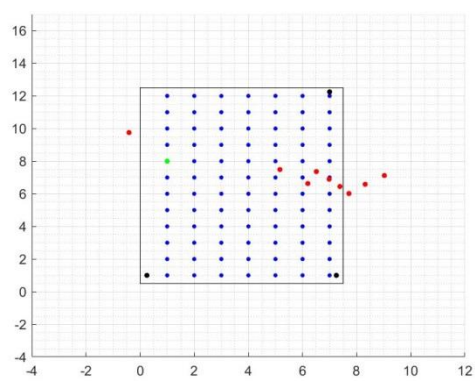
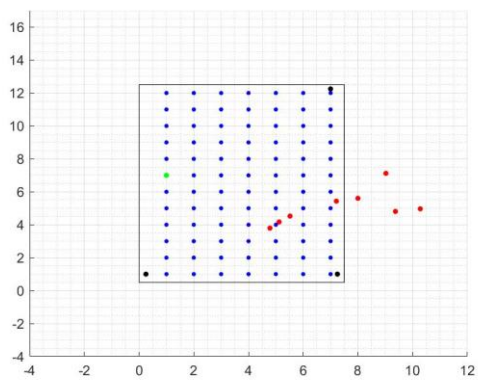
6. Anexos

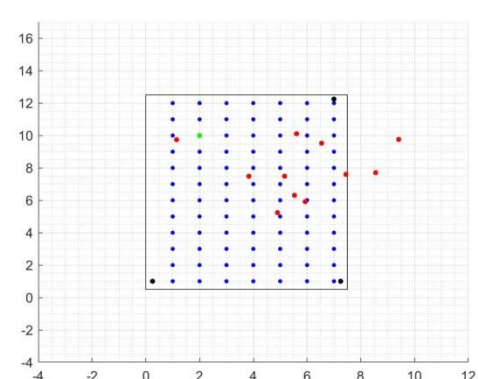
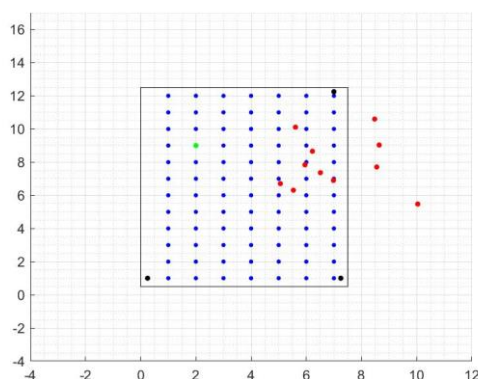
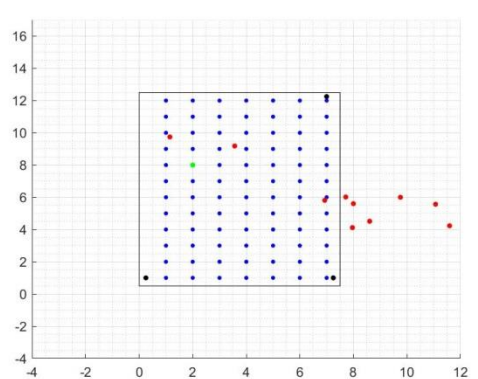
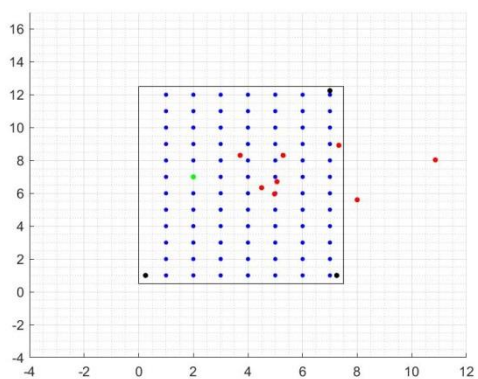
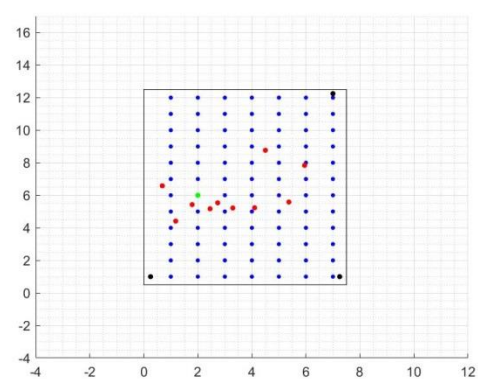
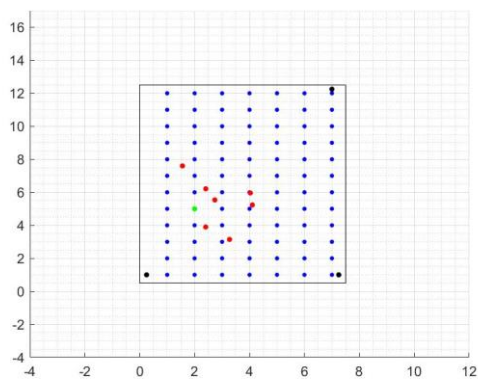
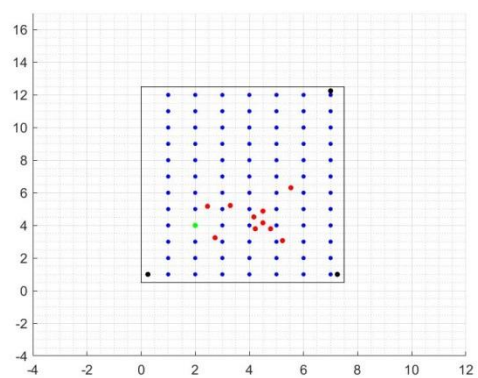
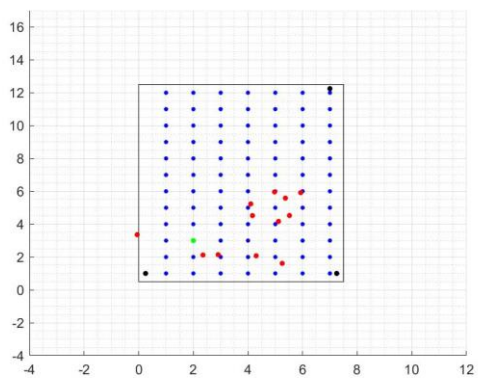
En los anexos se muestran partes importantes de códigos y resultados que pueden aportar demasiada información para explicar en el proyecto.

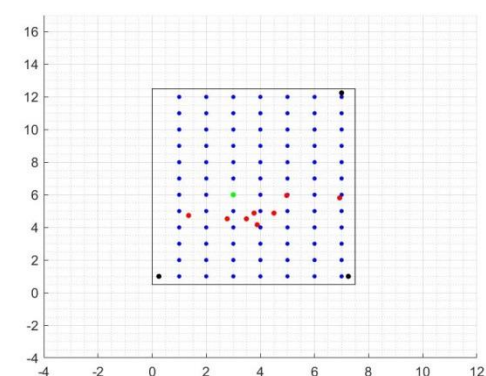
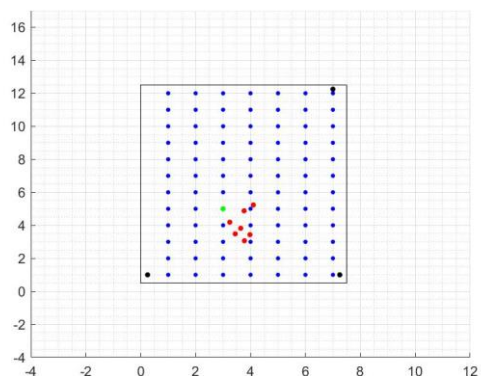
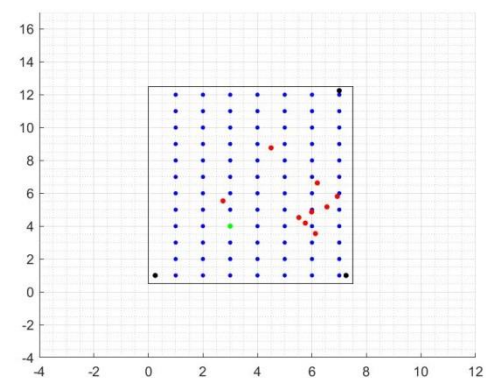
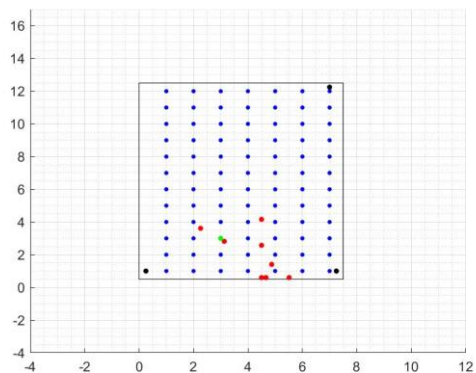
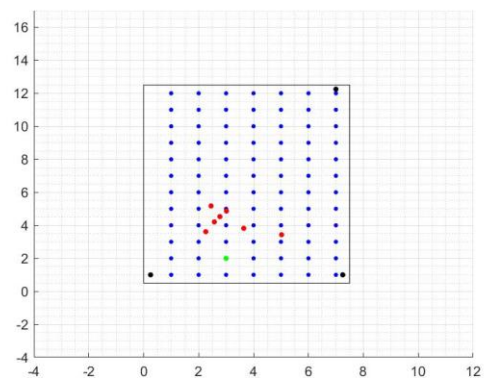
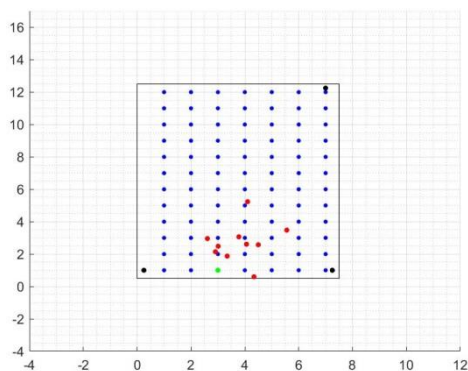
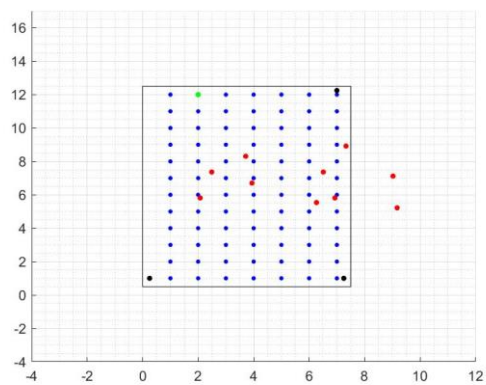
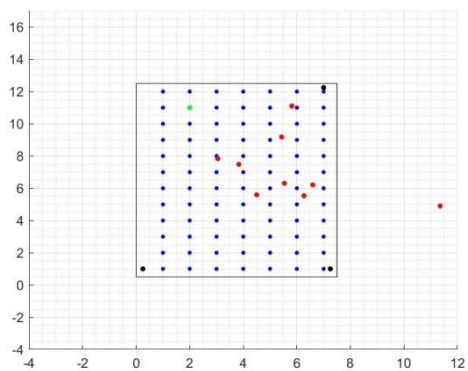
6.1 Anexo 1: Resultados RSSI

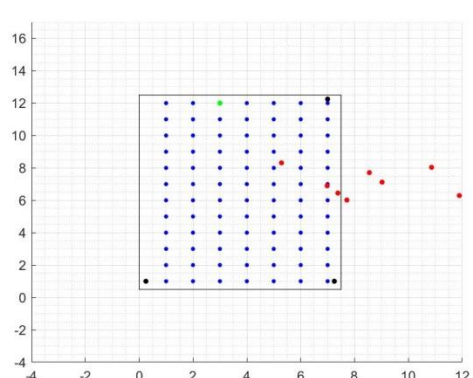
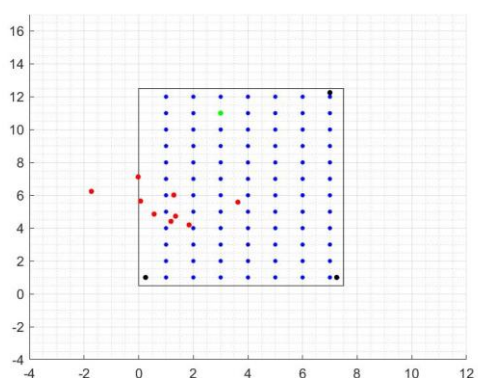
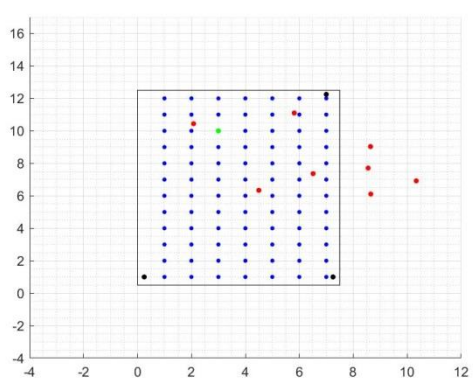
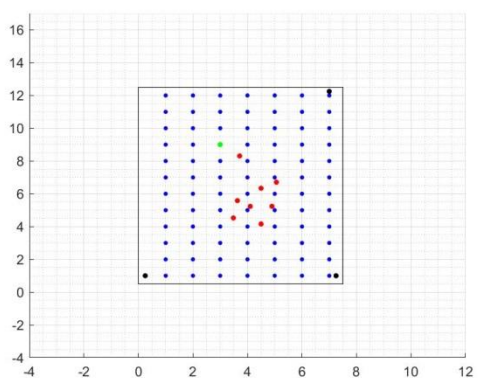
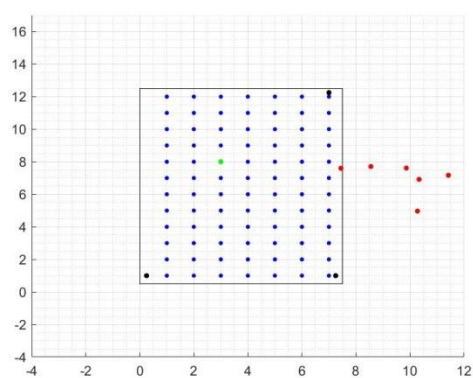
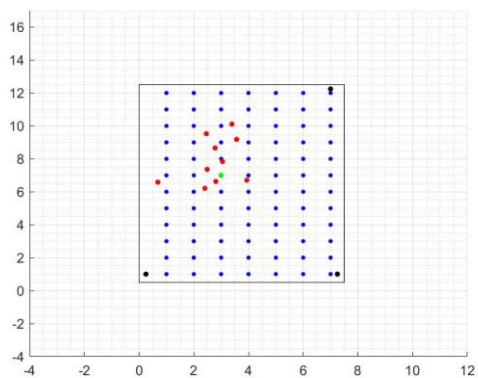
En este anexo se muestran las capturas obtenidas para las medidas de RSSI.

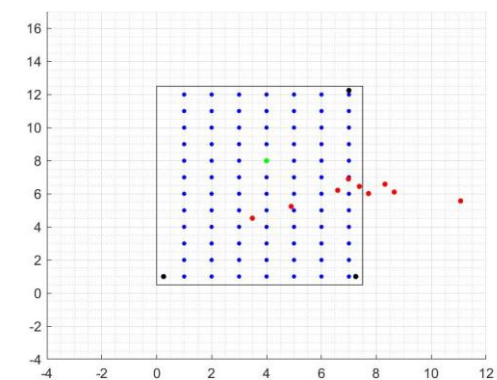
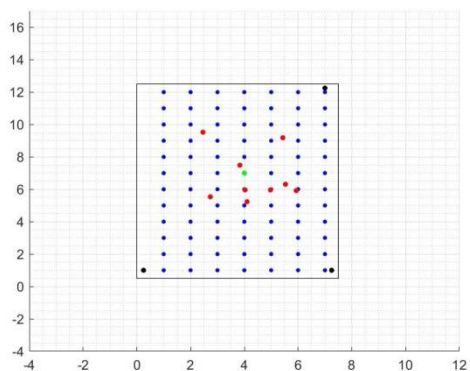
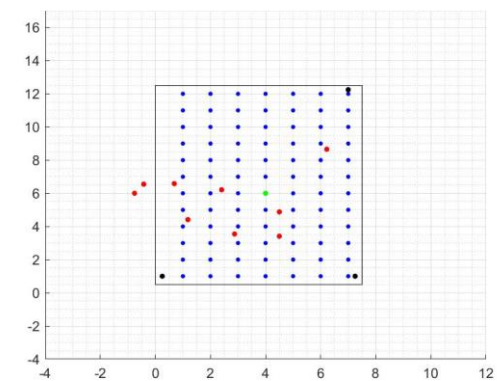
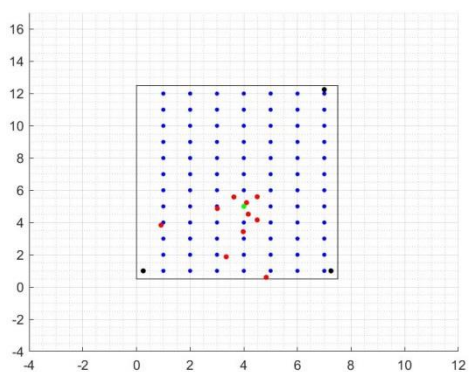
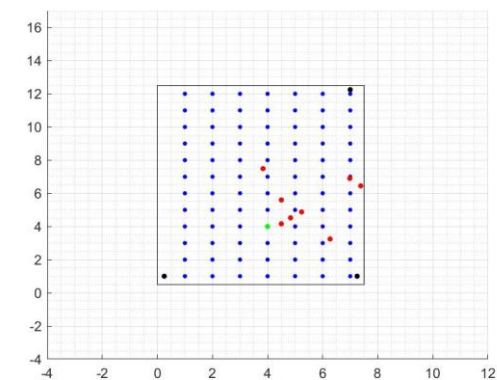
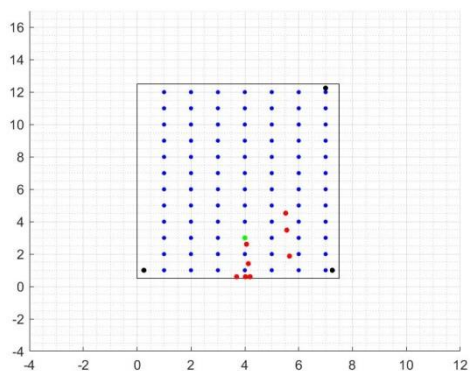
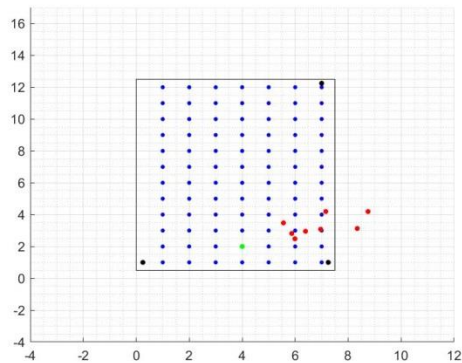
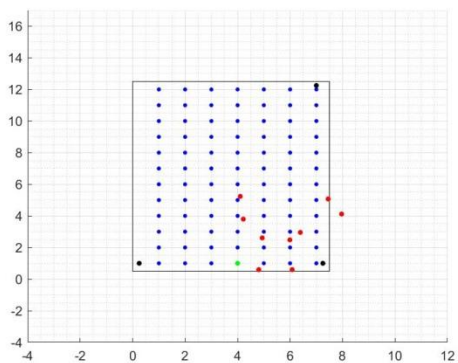


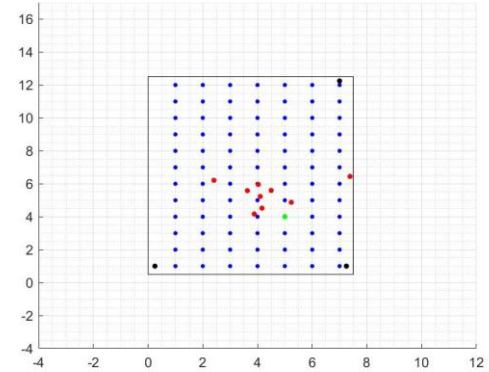
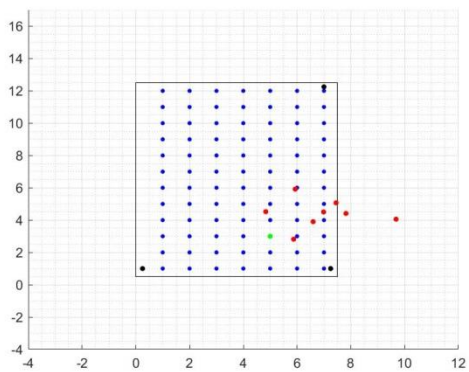
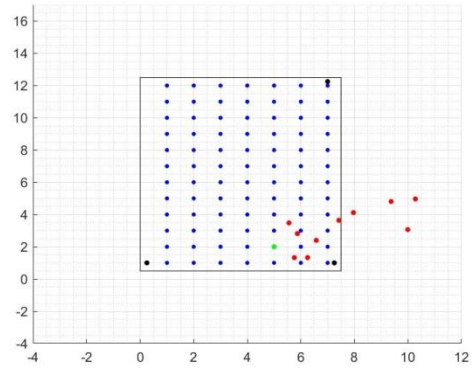
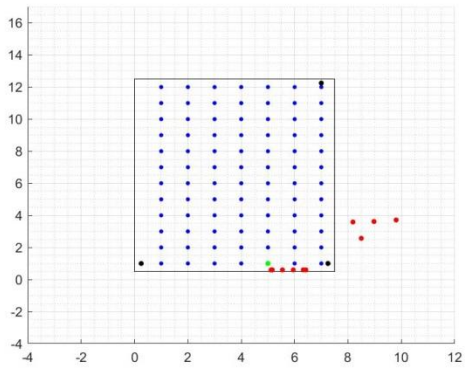
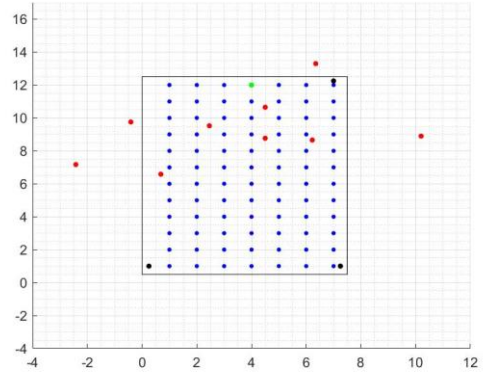
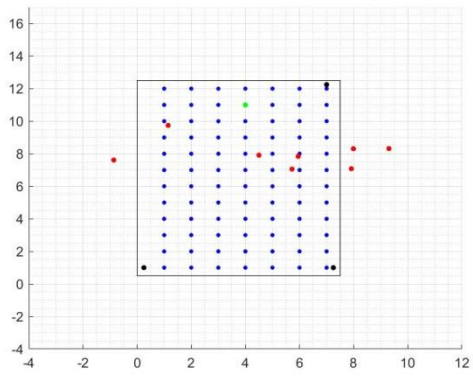
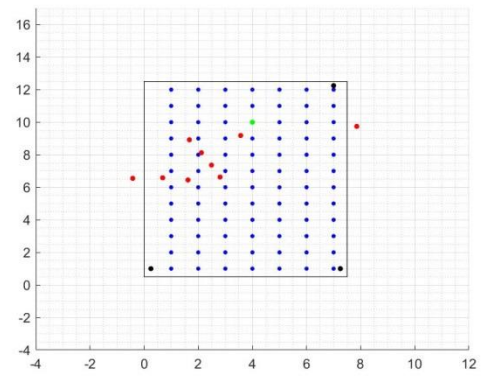
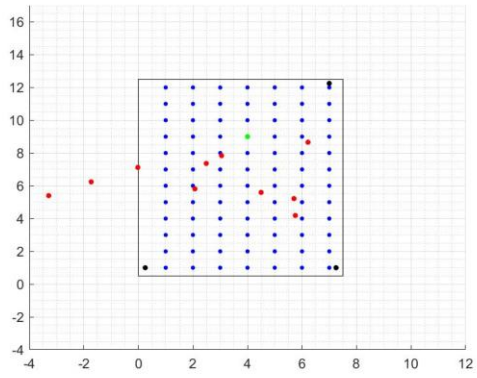


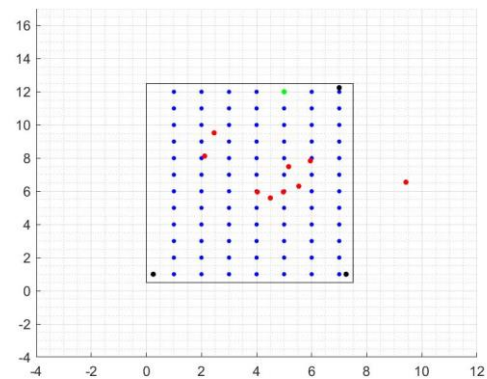
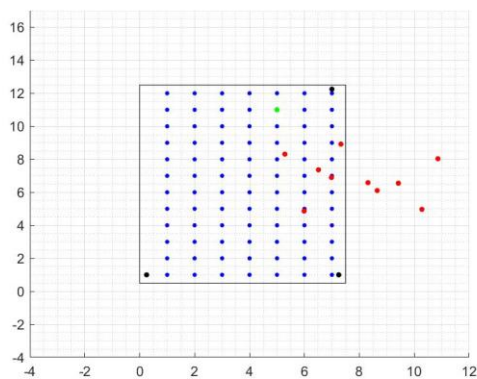
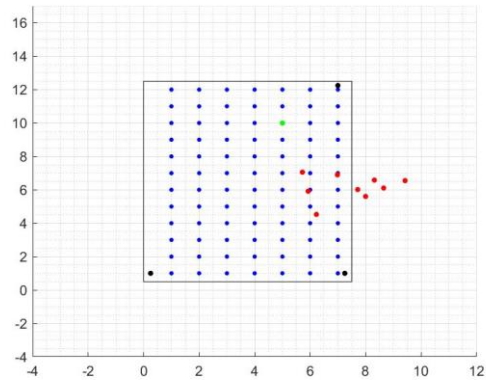
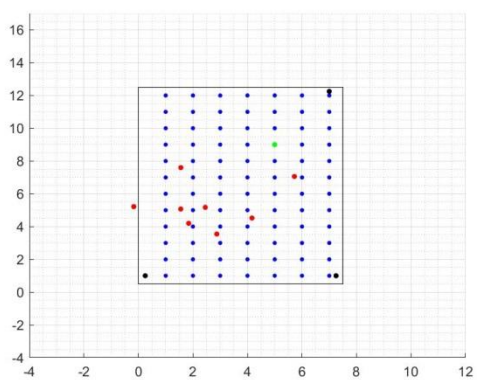
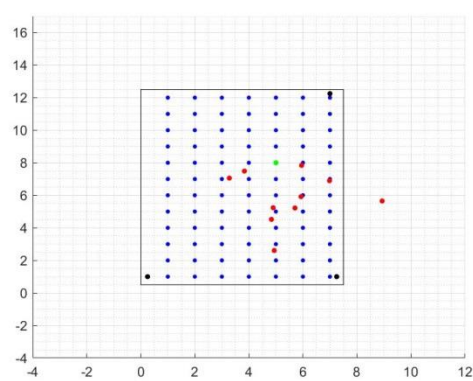
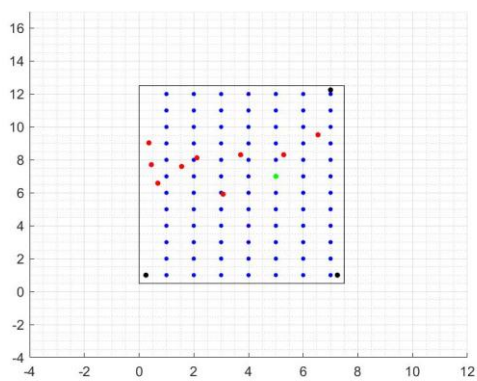
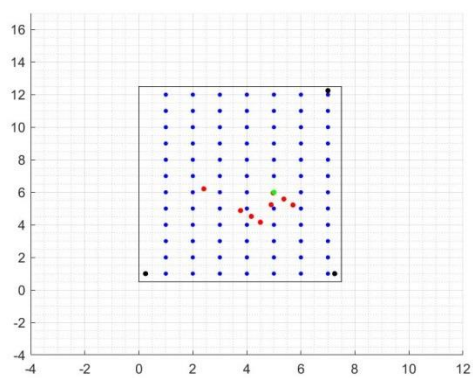
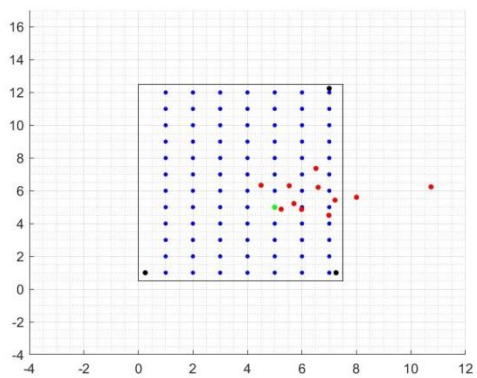


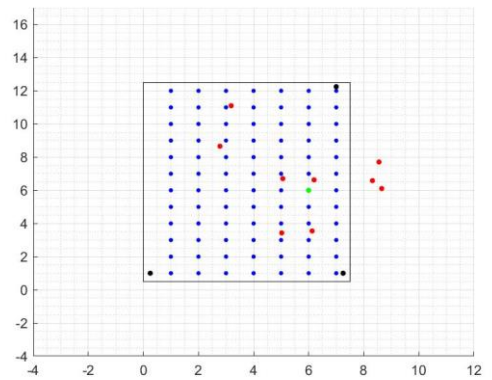
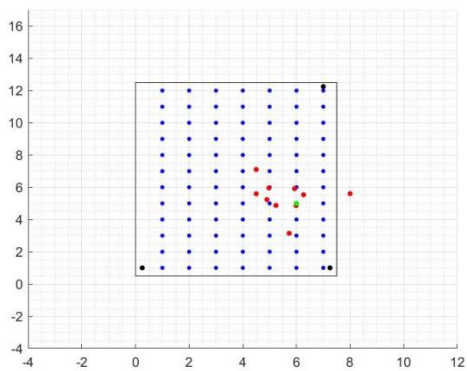
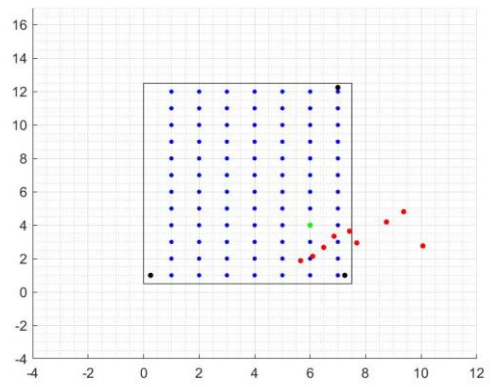
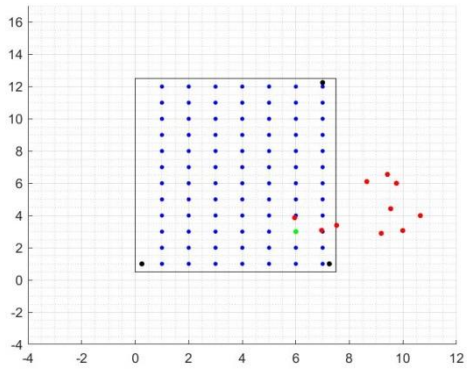
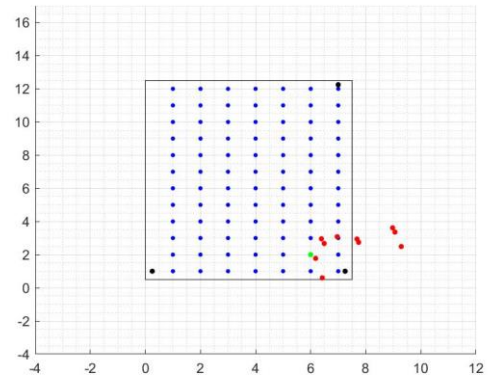
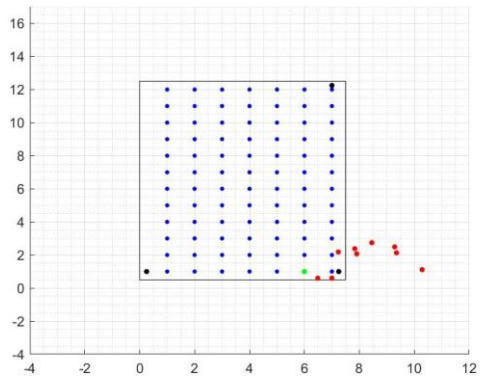


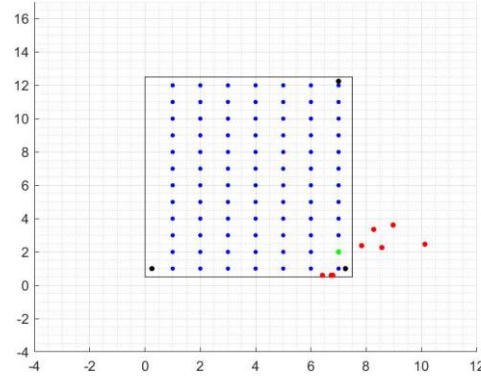
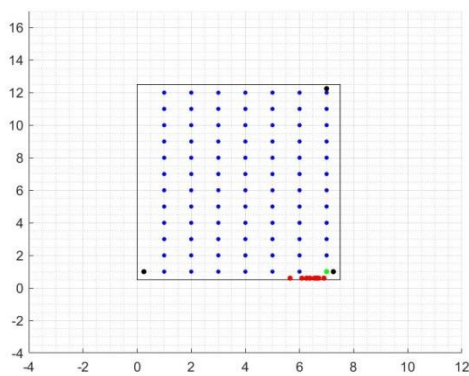
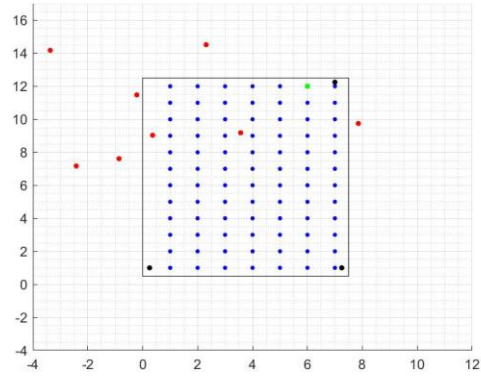
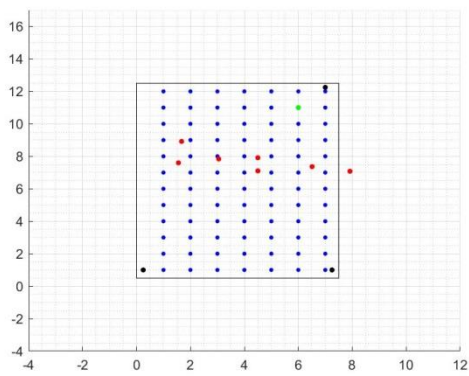
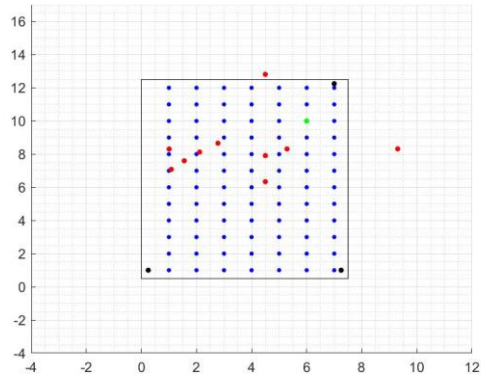
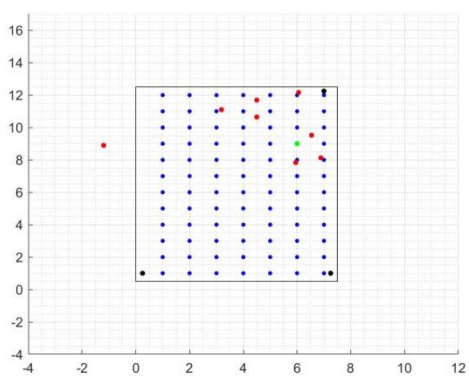
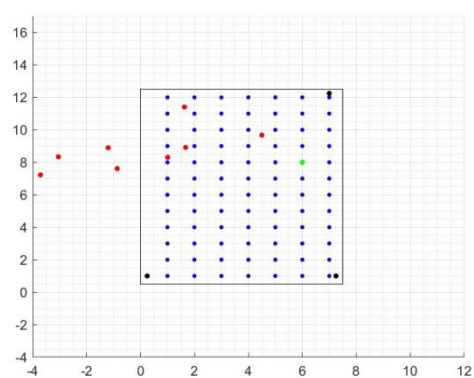
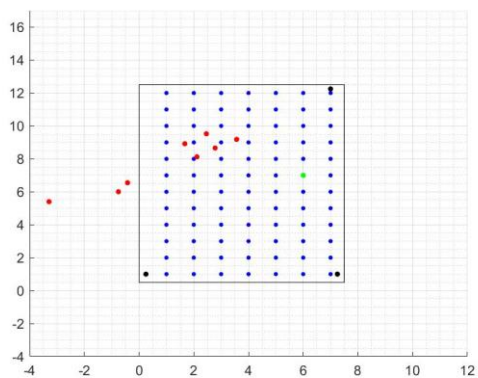


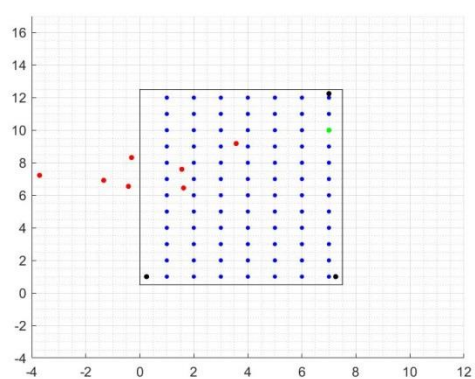
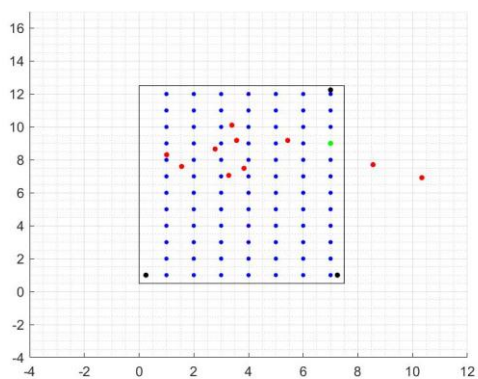
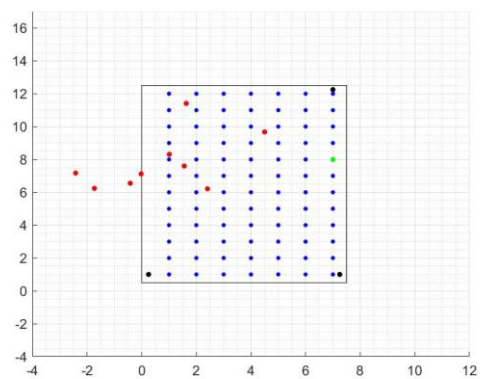
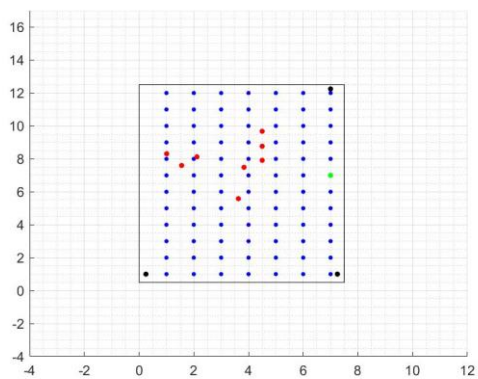
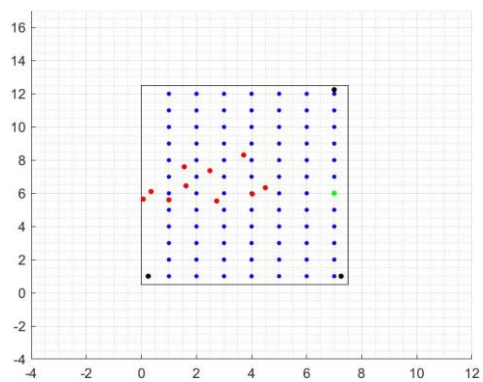
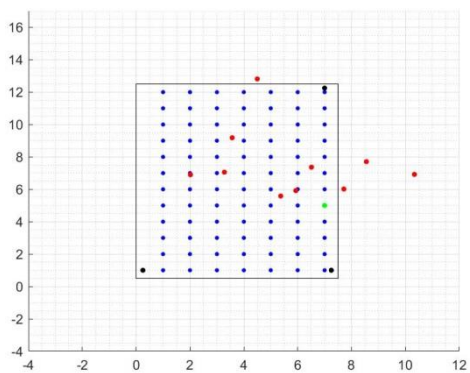
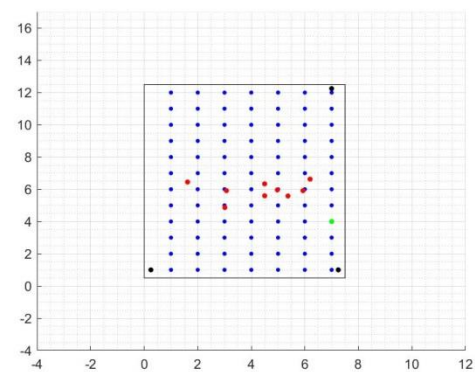
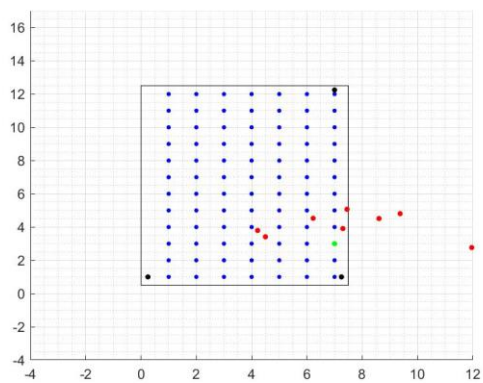


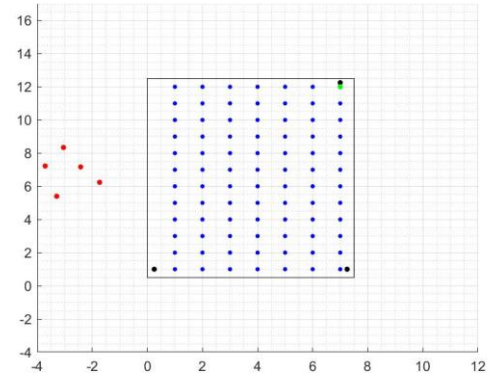
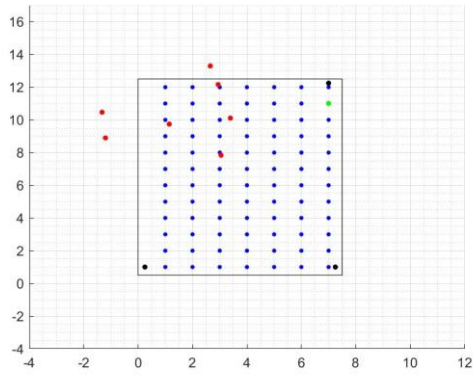






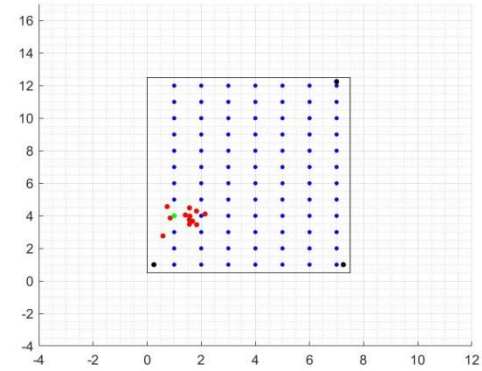
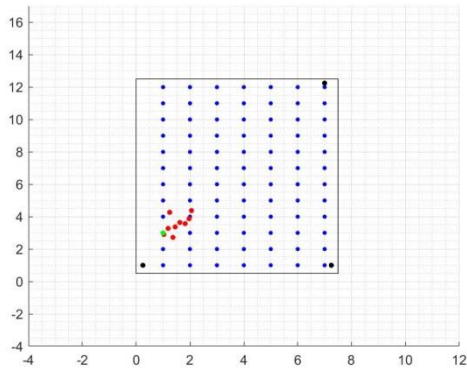
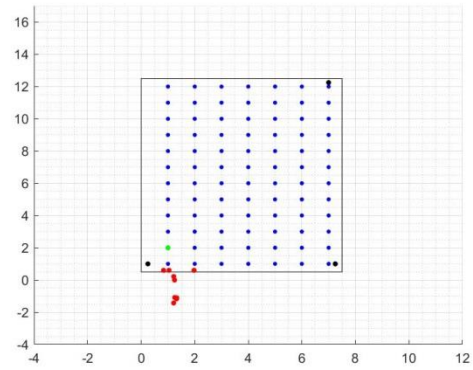
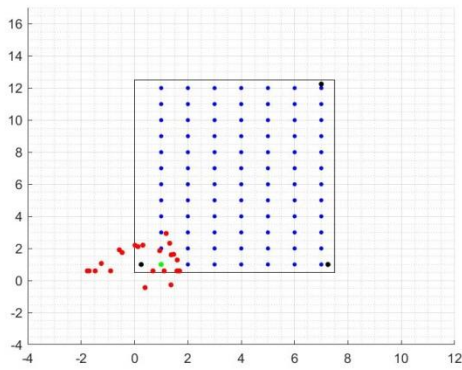


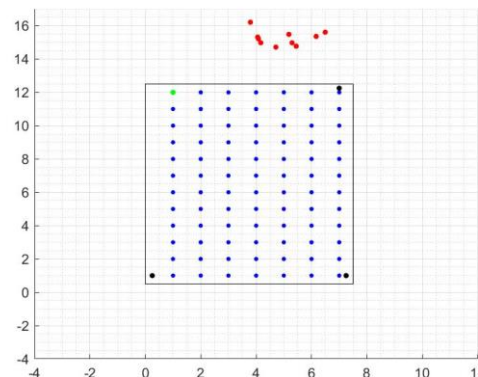
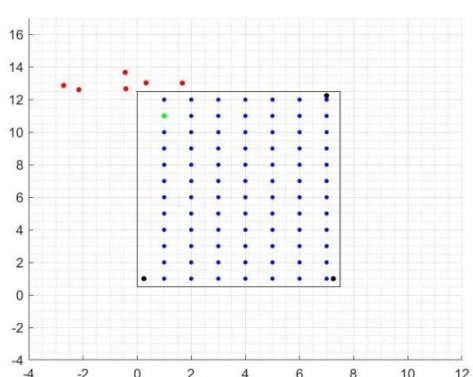
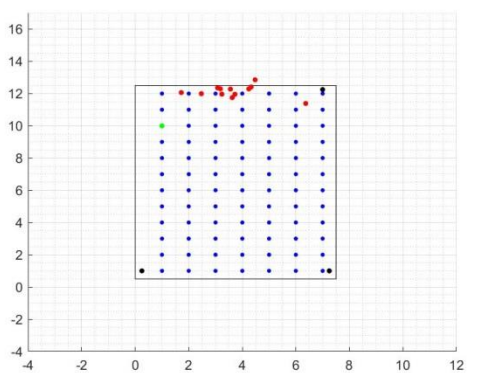
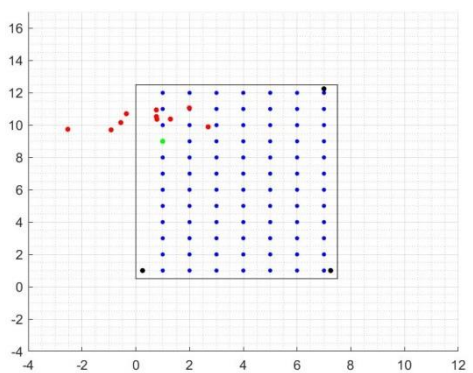
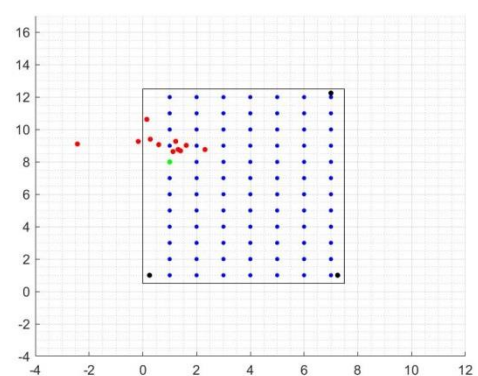
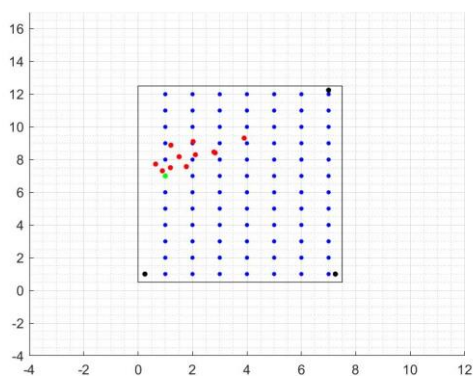
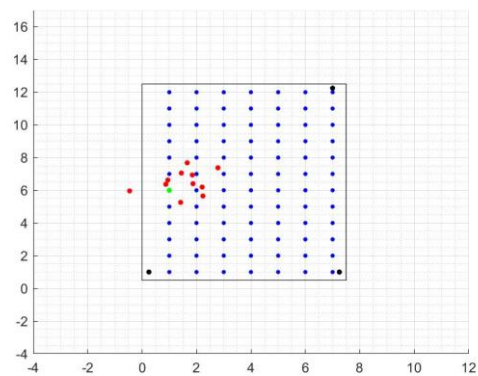
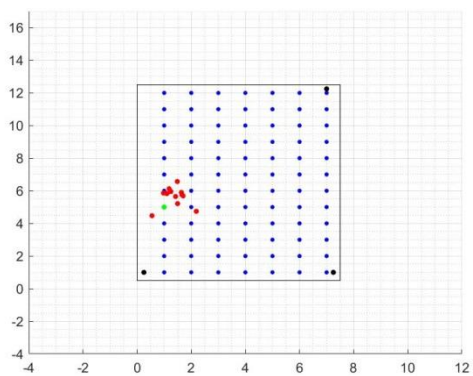


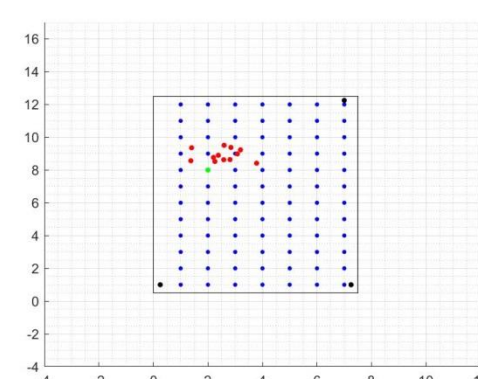
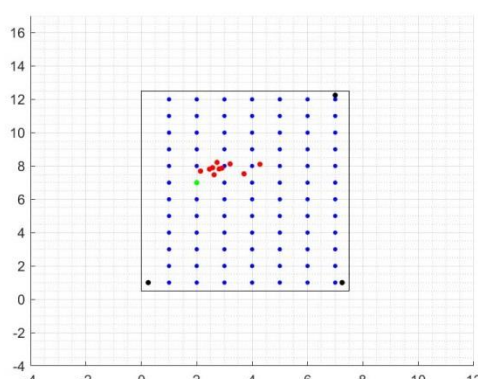
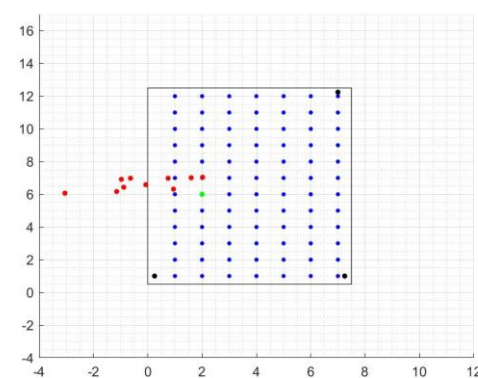
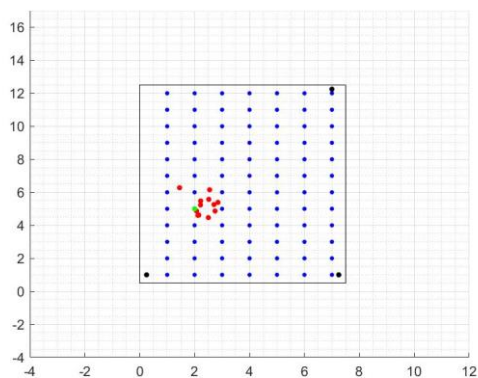
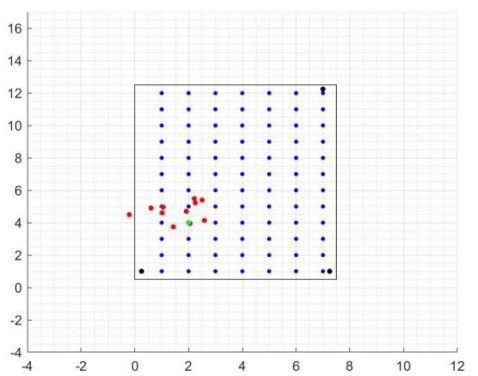
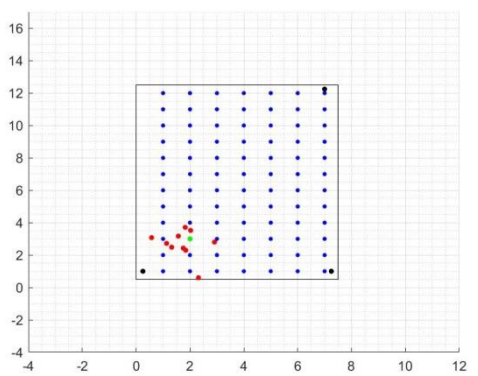
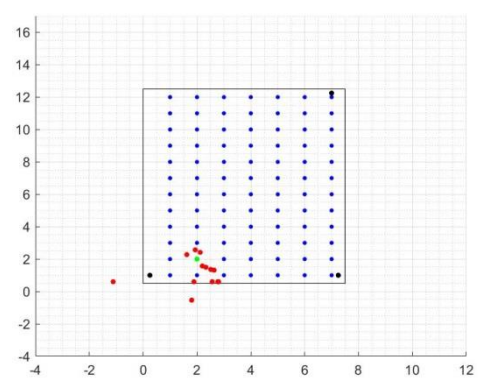
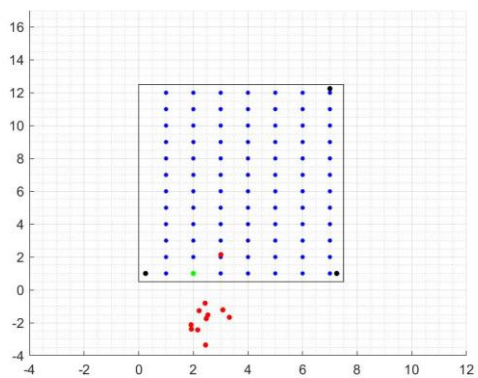


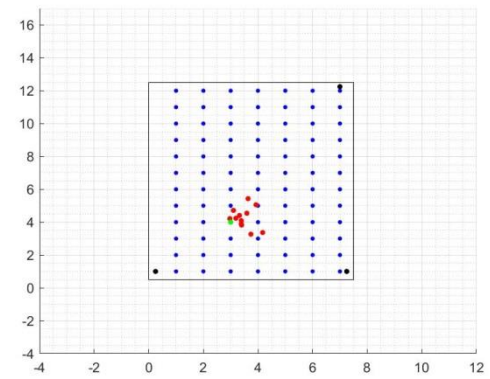
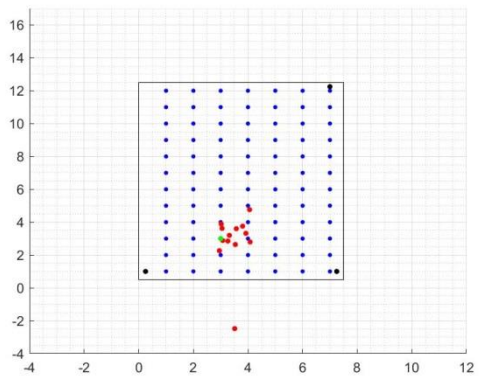
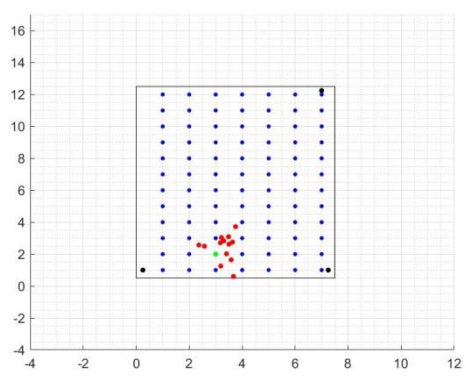
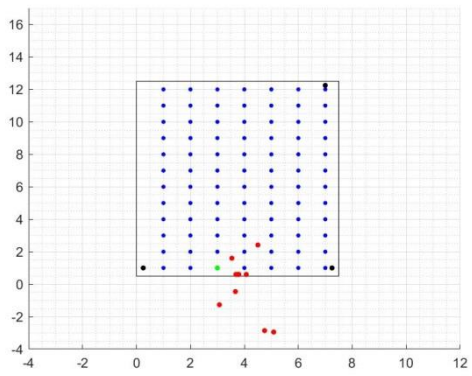
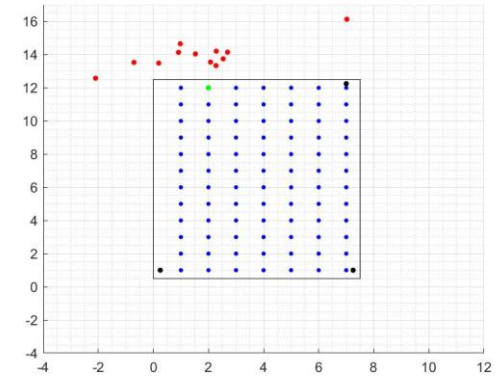
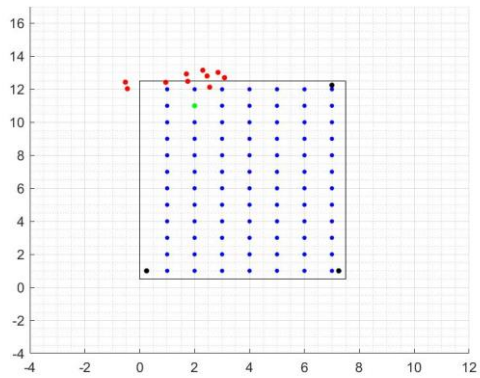
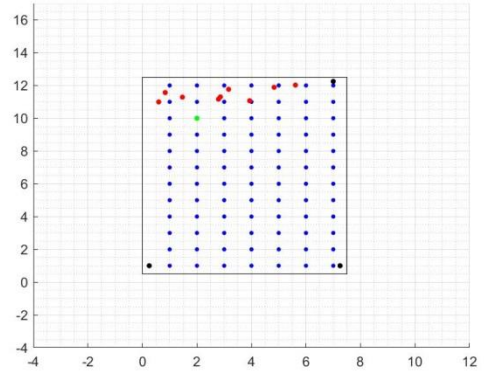
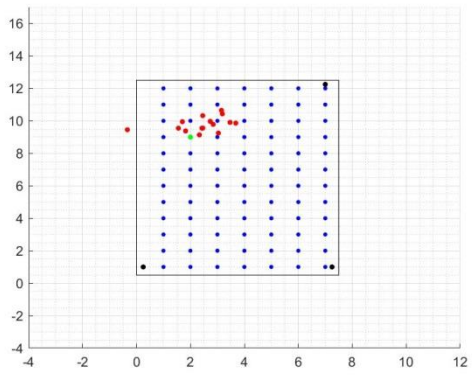
6.2 Anexo 2: Resultados RTT

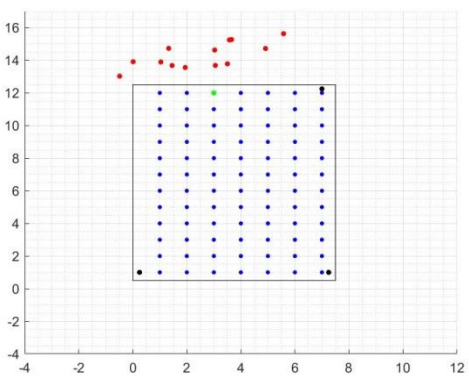
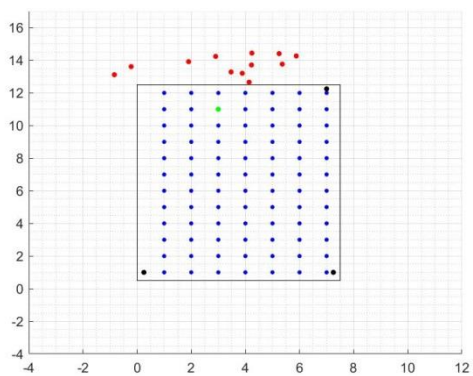
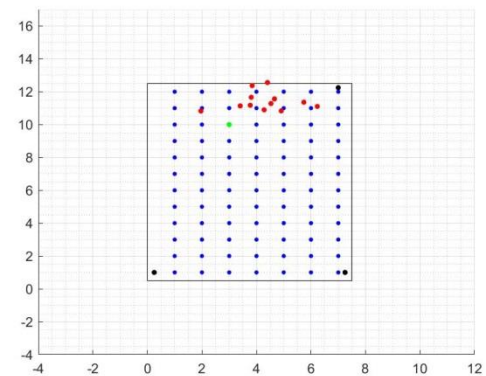
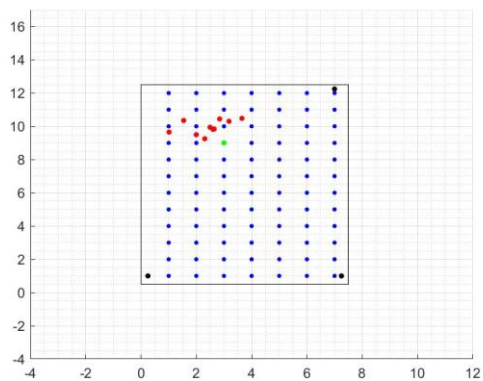
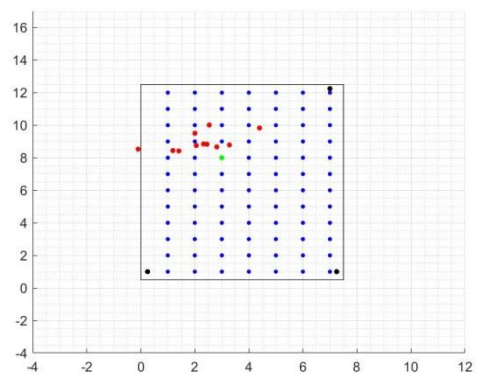
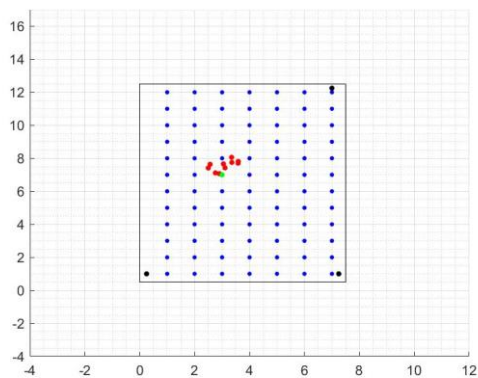
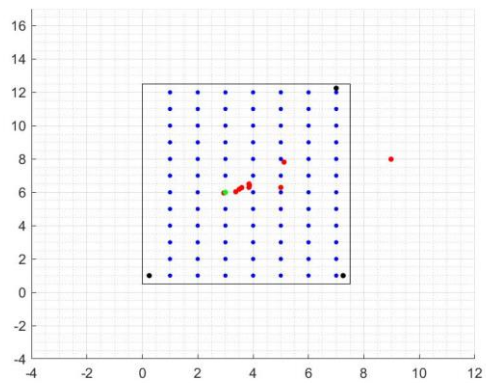
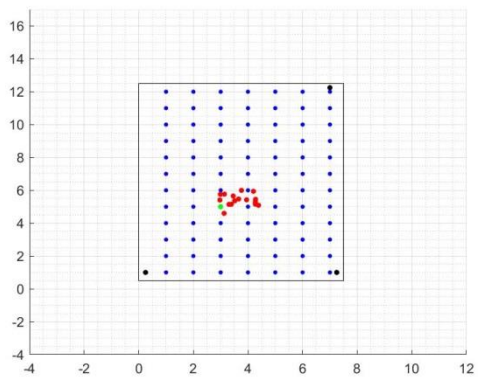
En este anexo se muestran las capturas obtenidas para las medidas de RTT.

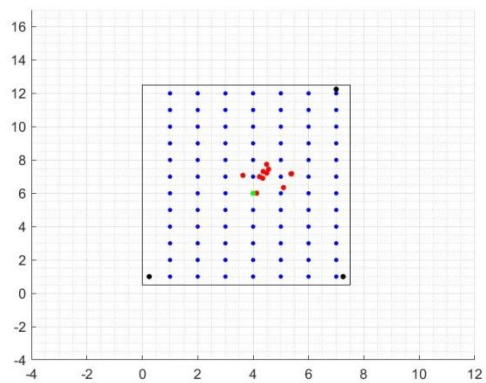
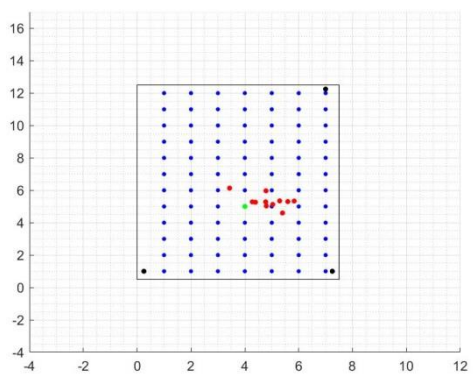
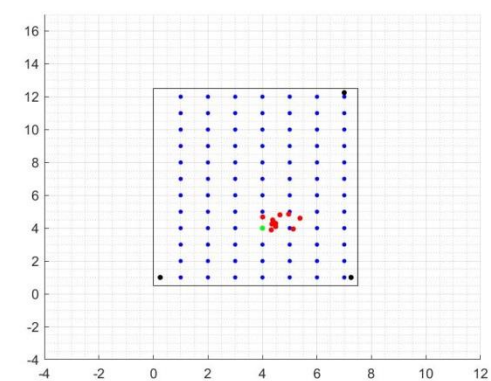
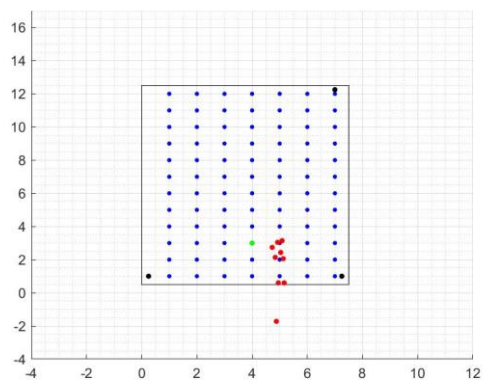
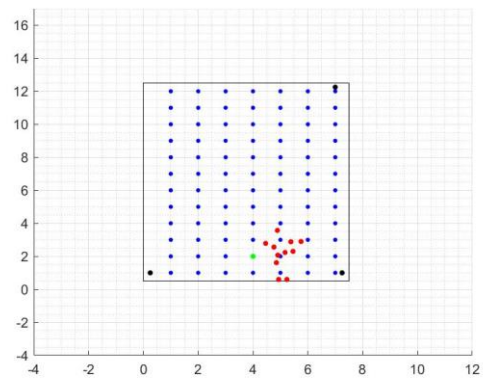
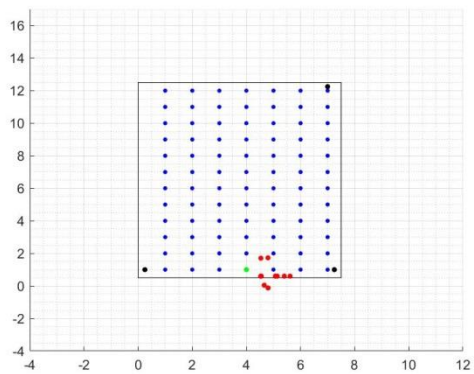


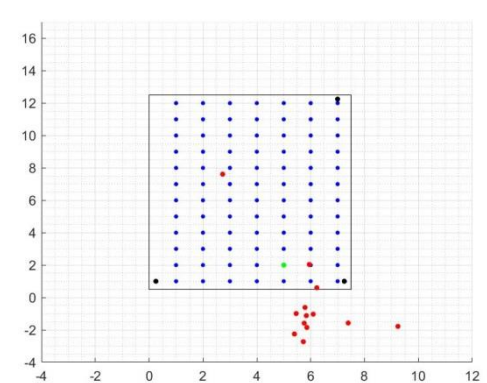
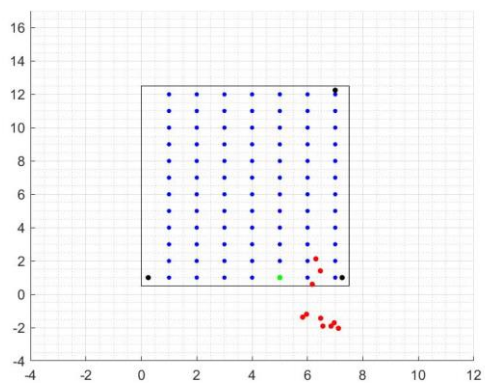
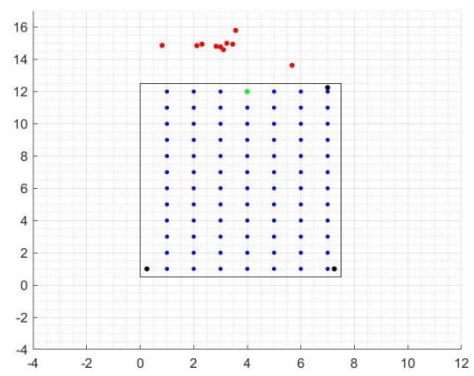
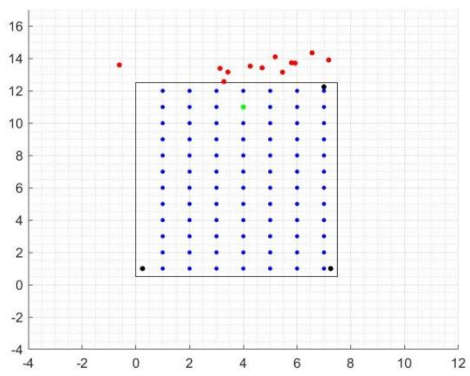
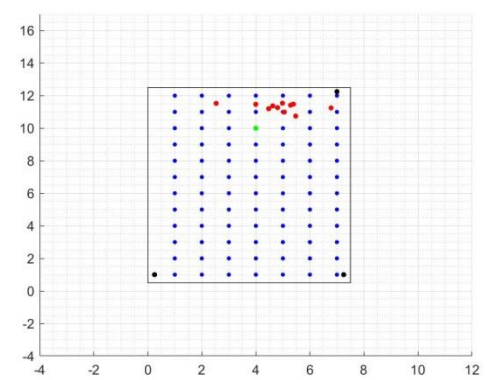
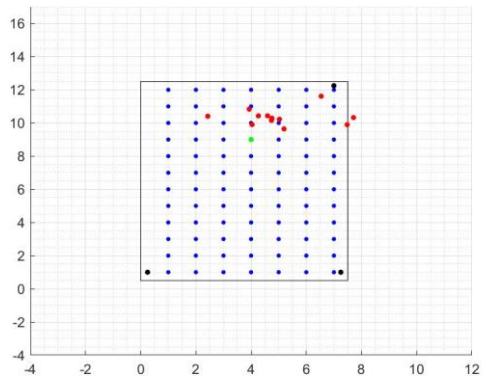
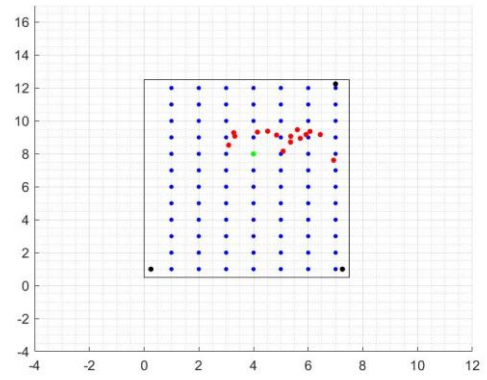
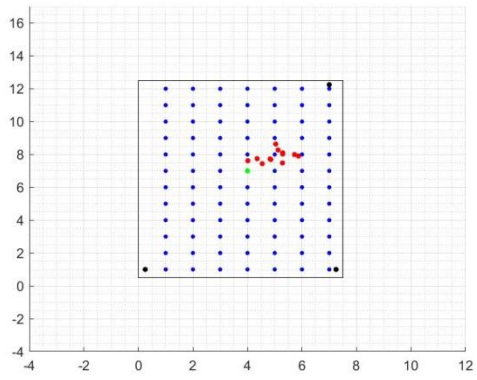


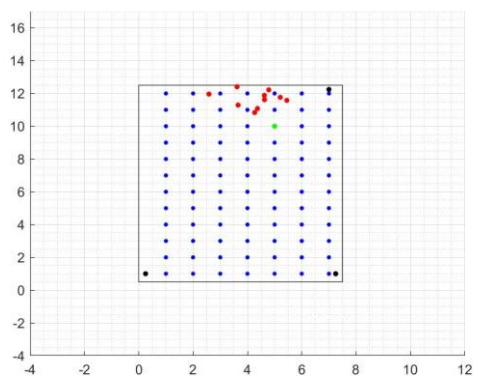
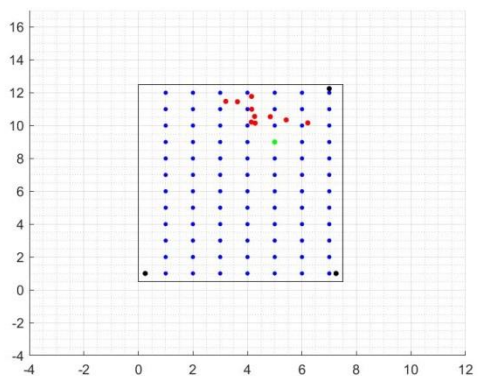
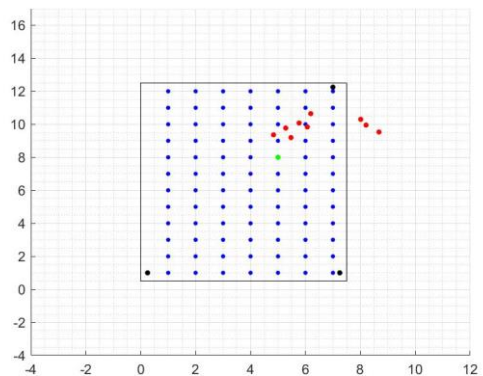
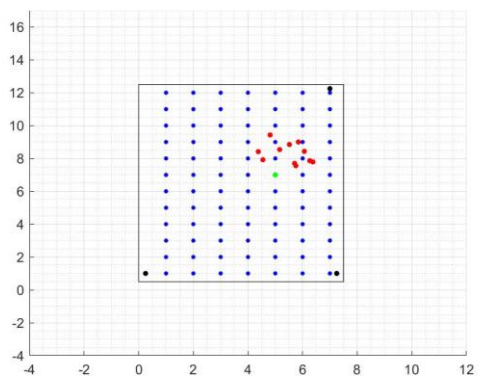
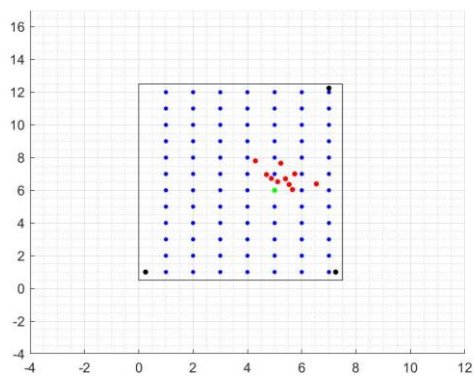
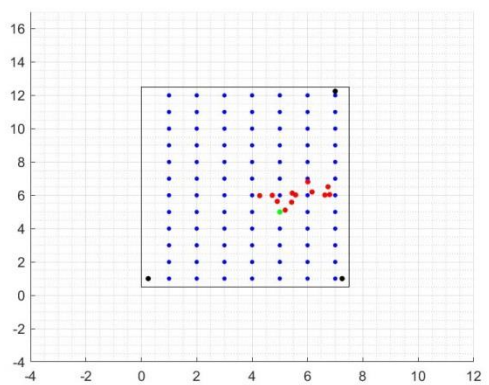
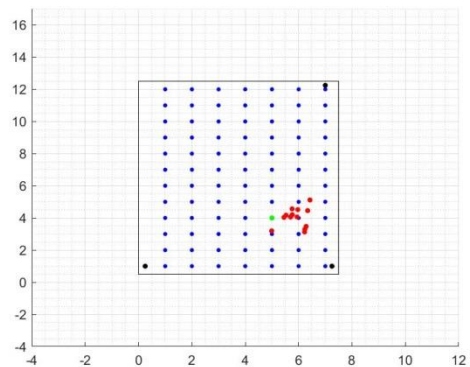
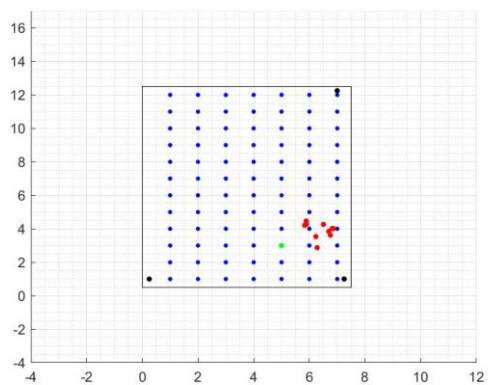


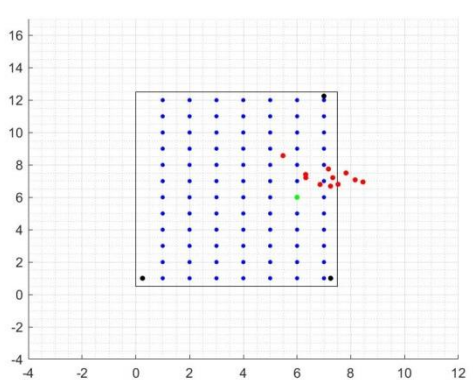
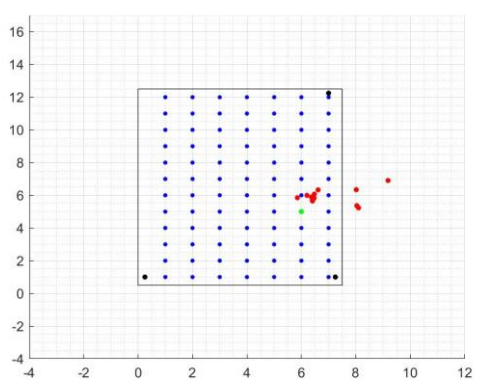
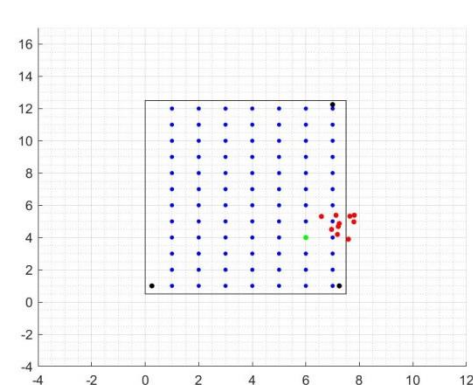
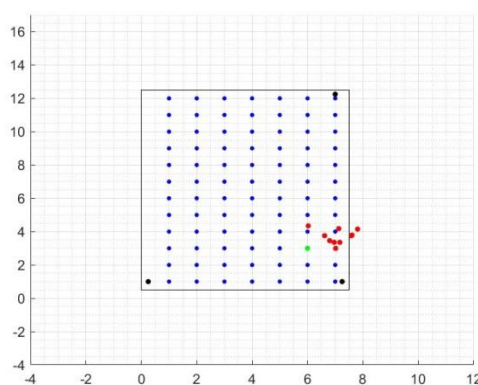
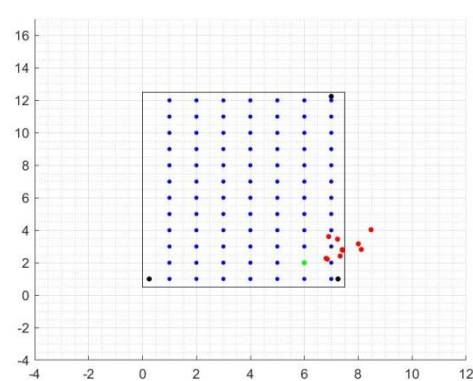
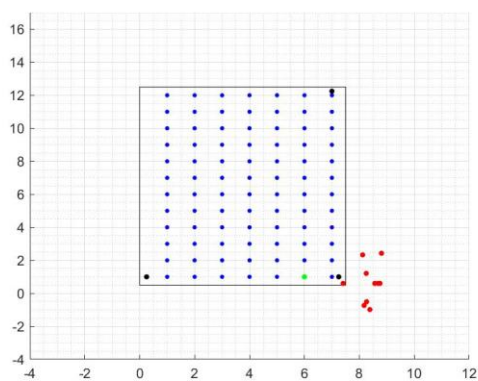
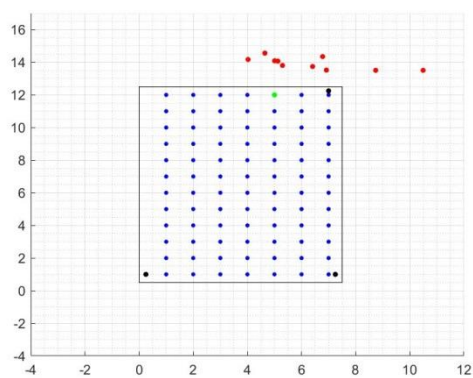
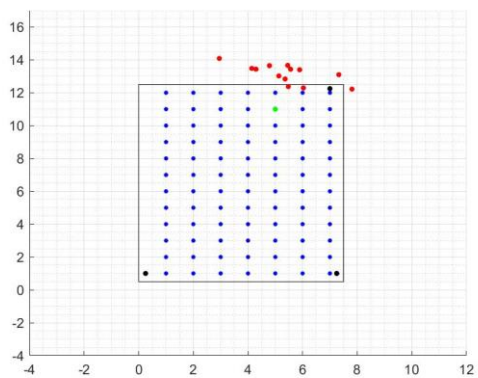


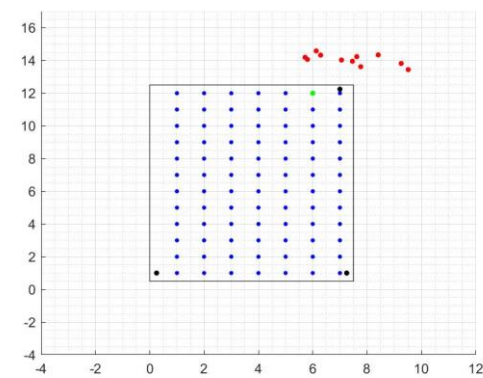
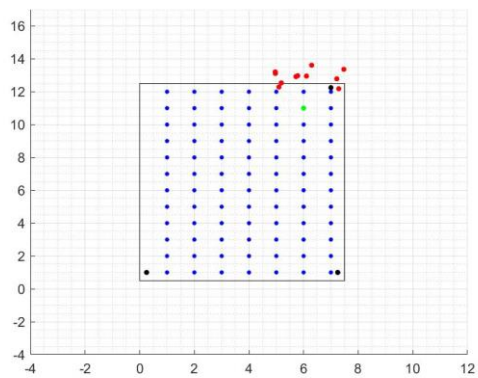
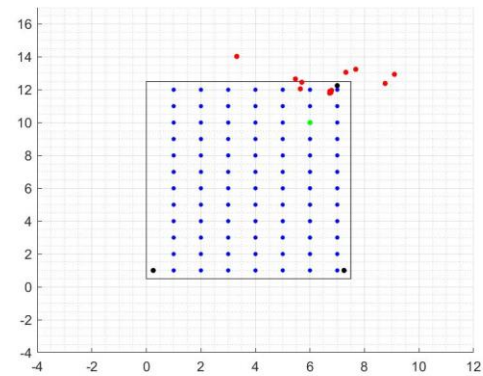
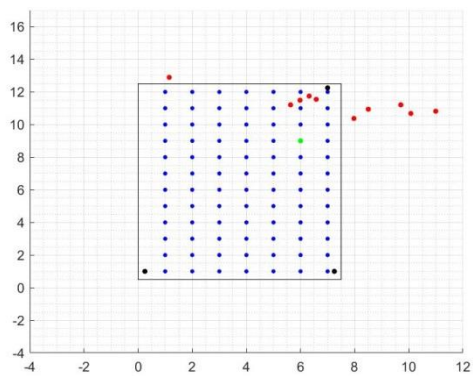
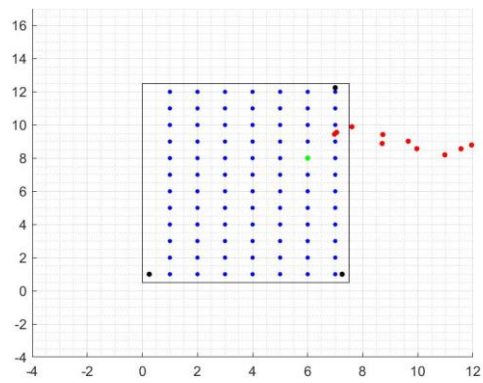
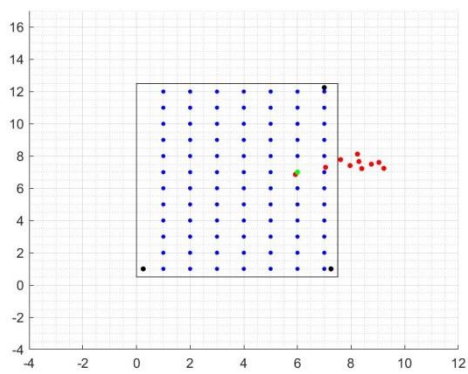


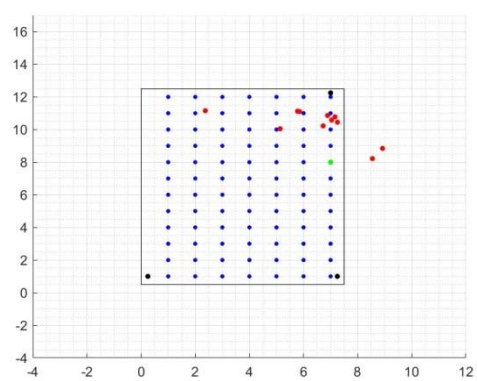
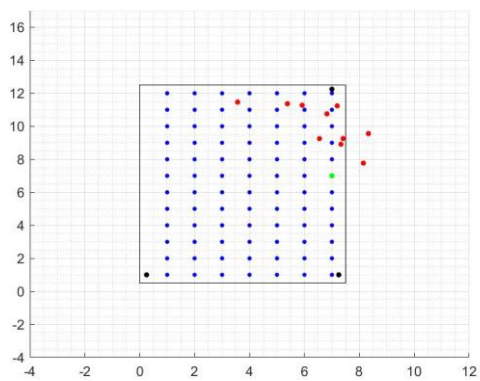
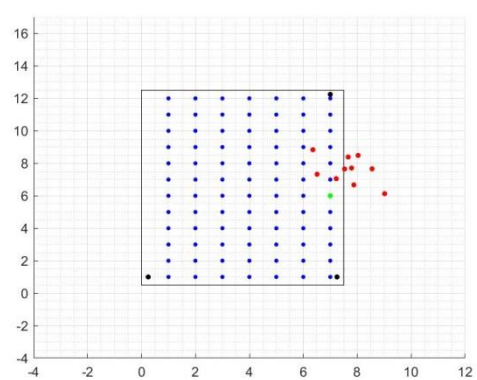
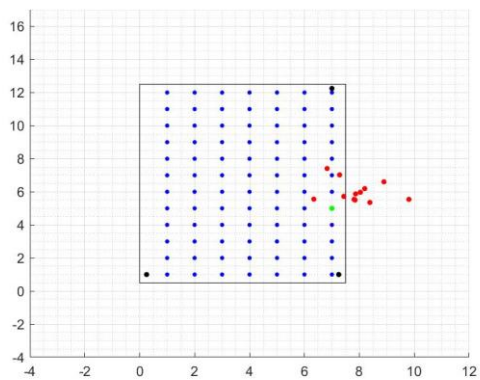
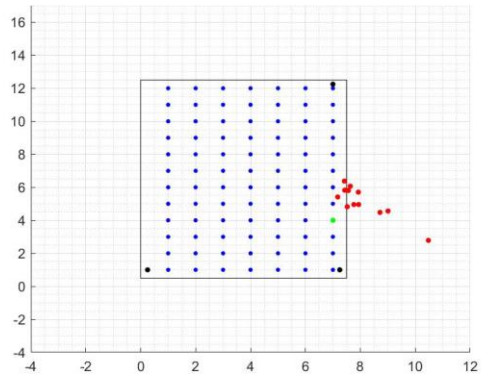
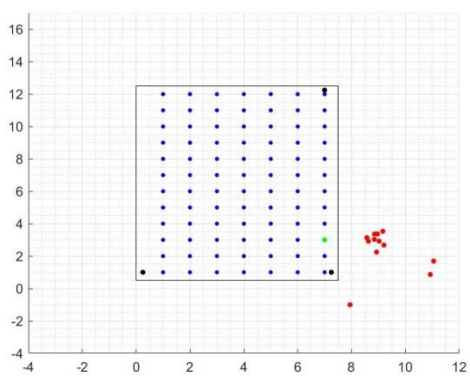
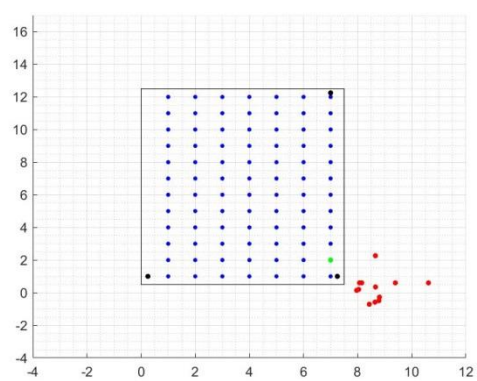
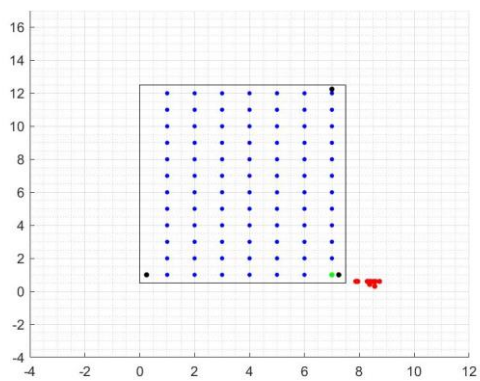


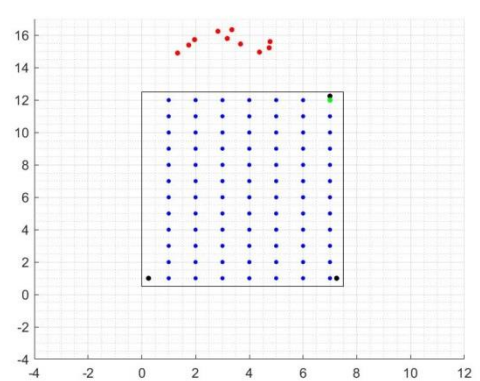
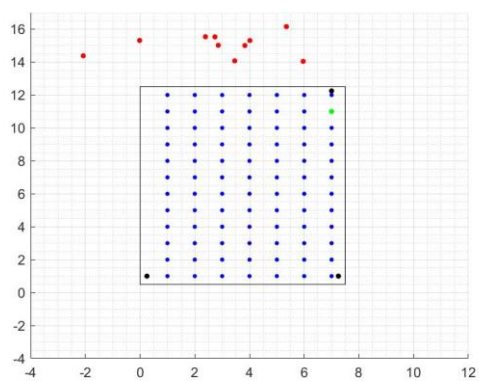
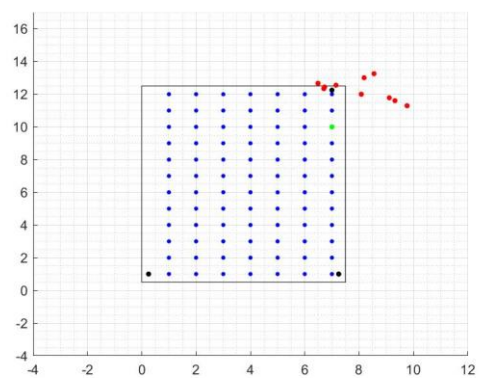
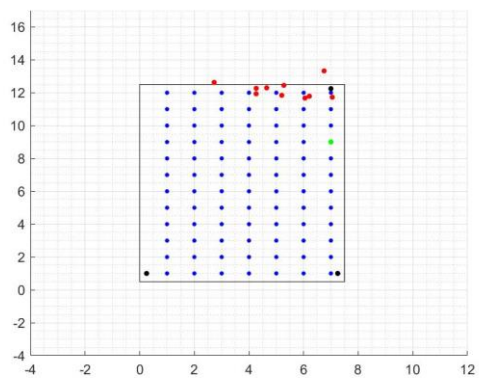












Bibliografía

- [1] What is GNSS? (2021, 17 mayo). EU Agency for the Space Programme.
<https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss>
- [2] GPS.gov: Space Segment. (s. f.). GPS.Gov.
<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [3] J. L. Berné Valero, N. Garrido Villen y R. Capilla Romá, "GNSS: GPS, Galileo, Glonass, Beidou. Fundamentos y Métodos De Posicionamiento", (1st ed.) 2019.
<http://hdl.handle.net/10251/118522>
- [4] Galileo is the European global satellite-based navigation system. (2021, 18 junio). EU Agency for the Space Programme.
<https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/What-Galileo>
- [5] QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) - Cabinet Office (Japan); (s. f.). Quasi-Zenith Satellite System(QZSS).
<https://qzss.go.jp/en/>
- [6] IRNSS Programme - ISRO. (s. f.). IRNSS.
<https://www.isro.gov.in/irnss-programme>
- [7] 802.11: estándares de Wi-Fi y velocidades. (2018, 3 febrero). IDG Communications S.A.U.
<https://www.networkworld.es/wifi/80211-estandares-de-wifi-y-velocidades>
- [8] García, A. (2021, 5 marzo). WiFi 802.11mc: ¿cómo funciona el GPS para interiores? ADSLZone.
<https://www.adslzone.net/2018/03/21/802-11mc-gps-interior/>
- [9] Gómez Treviño, E. (2014). Trilateración: Sismos, GPS, rayos y teléfonos celulares y la XIX Olimpiada de Ciencias de la Tierra.
<https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos14-2/trilateracion-34-2.pdf>
- [10] Gozalo Madrazo, A. (2017). Estudio y desarrollo de una solución efectiva para el problema del posicionamiento en interiores.
- [11] Gómez Ortiz, J. (2018). Estudio de la aplicación de Machine Learning a técnicas de posicionamiento en interiores.
- [12] González Oliva, C. (2020). Mejoras basadas en Machine Learning sobre un sistema BLE para la zonificación y localización en interiores.
- [13] Calzada Cabano, C. (2020). Mejoras basadas en el análisis del Path-Loss sobre un sistema BLE para la localización en interiores.

[14] PACCHA COLALA, B. M. (s. f.). Implementación de un Sistema de Localización empleando RTT y la Técnica Radar Monopulso mediante Open Source.

<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8853/tfg-pac-imp.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[15] Sistemas de posicionamiento basados en satélites (GNSS). (2015, 7 febrero). [Imagen]. <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/02/sistemas-de-posicionamiento-basados-en.html>

[16] Westreicher, G. (s. f.). Baricentro de un triángulo [Imagen]. <https://economipedia.com/definiciones/baricentro-de-un-triangulo.html>

[17] Nahuel, V., Poletto, G. A., Cáceres, M., & Busso, A. J. (s. f.). CÁLCULO DE DISTANCIA ENTRE LOS NODOS DE UNA RED INALÁMBRICA ZIGBEE EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO RSSI.

https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjLn5Gvn93xAhVRA2MBHXjgDggQFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Frevistas.unne.edu.ar%2Findex.php%2Ffeitt%2Farticle%2Fdownload%2F275%2F241&usg=AOvVaw1cS4kd9F7RqHBkmAmKLf_O